

LUCAS BENVEGNÚ ZAMBON

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Impacto sistêmico da reconfigurabilidade de
um amplificador de baixo ruído em uma cadeia
de recepção de Rádio Frequência**

Curitiba, 2014.

LUCAS BENVEGNÚ ZAMBON

PROJETO DE DISSERTAÇÃO

**Impacto sistêmico da reconfigurabilidade de
um amplificador de baixo ruído em uma cadeia
de recepção de Rádio Frequência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. André Mariano, Ph.D.

Co-Orientador: Prof. Luis Lolis, Ph.D.

Curitiba, 2014.

-
- Z24i Zambon, Lucas Benvegnú
 Impacto sistêmico da reconfigurabilidade de um amplificador de baixo ruído em uma cadeia de recepção de rádio frequência / Lucas Benvegnú Zambon. – Curitiba, 2014.
 77f. : il., tab.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
- Orientadora: *André Mariano*, Coorientador: *Luis Lolis*.
 Bibliografia: p. 70-77.
1. Radiofrequência. 2. Radio - Receptores e recepção. 3. Energia - Consumo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mariano, André Augusto. III. Lolis, Luis Henrique Assumpção. IV. Título.

CDD: 621.38456



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PPGEE
Setor de Tecnologia

ATA DE DEFESA DE MESTRADO

Aos vinte e cinco dias do mês de fevereiro de 2014, na Sala PK 07 do Departamento de Engenharia Elétrica, foi instalada pela Prof^a. Dr^a. Thelma Solange Piazza Fernandes, Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, a Banca Examinadora para a centésima quadragésima oitava Dissertação de Mestrado do PPGEE, na Área de Concentração em **SISTEMAS ELETRÔNICOS**. Estiveram presentes no ato, além da Coordenadora do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes.

A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ficou constituída pelos professores doutores **André Augusto Mariano (Orientador - UFPR); Glauber Brante (UTFPR); Bernardo R. B. de Almeida Leite (UFPR) e Eduardo Gonçalves de Lima (UFPR) E Luis Henrique Assumpção Lolis (Co-Orientador - UFPR).**

Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **LUCAS BENVENÚ ZAMBON** a fazer a apresentação da dissertação intitulada **"IMPACTO SISTÊMICO DA RECONFIGURABILIDADE DE UM AMPLIFICADOR DE BAIXO RUÍDO EM UMA CADEIA DE RECEPÇÃO DE RÁDIO FREQUÊNCIA"**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes.

Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela:

☒ **APROVAÇÃO**

☐ **NÃO APROVAÇÃO** do candidato, (de acordo com a determinação da Resolução 63/03-CEPE).

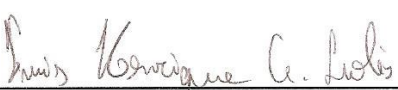
Curitiba, 25 de fevereiro de 2014.


Prof. Dr. André Augusto Mariano


Prof. Dr. Glauber Brante


Prof. Dr. Bernardo R.B. de Almeida Leite


Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima


Prof. Dr. Luis Henrique Assumpção Lolis



Agradecimentos

À Deus pela força nos momentos mais complicados.

Aos meus pais Lorete e Luis Pedro e irmã Laura pelo suporte, incentivo, paciência nos momentos de estresse, leituras da dissertação e escutar várias vezes aos ensaios das defesas.

À Mel pela presença constante e momentos de descontração.

À minha namorada Elaine pela consideração do tempo dedicado ao mestrado, carinho, paciência nos momentos de estresse, por ter lido a dissertação várias vezes e escutado os ensaios da defesa outras tantas vezes.

Aos meus orientadores André Mariano e Luis Lolis por terem aceitado a difícil tarefa de ensinar conceitos de rádio frequência à um cientista de computação, além do suporte técnico em todos os momentos necessários.

Aos colegas Carlos Marinho e Luis Duarte por ter oportunizado meus horários alternativos durante expediente de trabalho na Volvo.

Aos meus amigos pelas minhas seguidas recusas nas saídas e eventos nos quais era sempre entusiasta.

E a todos os demais que de diferentes maneiras contribuíram para esse resultado final.

Prometo que farei um churrasco de comemoração e convidarei os principais envolvidos.

RESUMO

Zambon, Lucas Benvegnú. **Impacto sistêmico da reconfigurabilidade de um amplificador de baixo ruído em uma cadeia de recepção de Rádio Frequência**. 2014. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPR, Curitiba.

O consumo de energia em aparelhos eletrônicos portáteis tornou-se uma variável de grande importância para os usuários e a indústria que os produz. Em função disso, a busca por componentes de hardware e software que venham a contribuir na redução do consumo de energia tem sido foco de muitas pesquisas. Como parte integrante dos aparelhos eletrônicos portáteis com comunicação sem fio, os receptores de radiofrequência são responsáveis por receber o sinal que será tratado, sendo foco de otimização do consumo de energia. Os receptores são formados por diversos blocos, entre os quais, o amplificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier*-LNA).

O presente trabalho tem por objetivo analisar o impacto de um LNA reconfigurável em um receptor de rádio frequência, para atingir tal objetivo, o trabalho foi desenvolvido da seguinte forma: A partir de um conjunto de formulações matemáticas foi possível obter valores de parâmetros sistêmicos do LNA isolado do receptor. Um algoritmo em MATLAB foi desenvolvido para analisar o impacto no consumo de um LNA reconfigurável a partir da potência do sinal de entrada. Por fim, demonstrando que o LNA reconfigurável consome menos energia que o LNA clássico.

Palavras chaves: dispositivos eletrônicos portáteis, LNA reconfigurável, Sistemas de rádio frequência, economia de energia.

ABSTRACT

Zambon, Lucas Benvegnú. **Systemic impact of a reconfigurable low noise amplifier on a RF reception chain.** 2014. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPR, Curitiba.

The power consumption of portable electronic devices became a very important variable, and the search for hardware and software that may contribute into saving power consumption has been the focus of several academic researches. As a part of portable devices with wireless communication, radio frequency receivers are responsible for receiving signal that will be treated. The receivers are composed by several blocks with different responsibilities, including the low-noise amplifier (LNA). This study aims the analysis the impact of a reconfigurable LNA into a radio frequency receiver chain, to achieve this goal, this study was developed in different parts as follow: A set of mathematical formulations, that allowed obtaining systematic parameters from LNA all isolated from the receptor itself, were created. An algorithm was developed in MATLAB in order to help the analysis of the impact of a reconfigurable LNA on power consumption. Finally, it was demonstrate that the reconfigurable LNA can consume less energy than the classical LNA.

Key words: portable electronic devices, reconfigurable LNA, RF System, energy saving.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS	10
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo geral:.....	14
1.1.2. Objetivos específicos:.....	14
1.2. Metodologia.....	15
2. SISTEMA RF E SEUS PARÂMETROS DE DESEMPENHO.....	17
2.1. Receptores de Rádio Frequência.....	18
2.1.1. Os blocos constituintes.....	18
a. LNA.....	18
b. Misturador.....	20
c. Oscilador	21
d. Conversor Analógico Digital	22
2.2. Cálculo de desempenho do sistema	23
2.2.1. Sensibilidade	23
2.2.2. Linearidade.....	24
2.2.3. Seletividade e Bloqueio	25
2.3. O impacto do consumo de energia sobre os aparelhos móveis.....	26
2.3.1. Reconfigurabilidade	26
2.3.2. Eficiência energética.....	28
3. LNA RECONFIGURÁVEL EM UM SISTEMA RF	31
3.1. LNA reconfigurável e o restante do sistema.....	32
3.2. Definição dos parâmetros do sistema em função de uma norma: G, NF, e IIP3. 34	
3.3. Aplicação para as especificações locais em função do sistema: a definição de G, NF, e IIP3 em cascata.....	37
3.4. Definição dos valores do Bloco2 de acordo com as normas utilizadas.	40
4. MODELAGEM DO SISTEMA RF	41
4.1. Algoritmo	42

4.1.1.	Estruturação de Dados	43
4.1.2.	Laços de teste	44
4.1.3.	Cálculos de valores	47
4.1.4.	Extração de dados do LNA reconfigurável	48
4.1.5.	Construção de resultados.....	48
5.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	49
5.1.	Resultados da norma de validação	51
5.2.	Resultados da norma <i>Bluetooth LE</i>	56
5.3.	Resultados da norma <i>Zigbee</i>	60
5.4.	Ponderações finais.....	63
6.	CONCLUSÃO	67
6.1.	Trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Comparação entre a leitura do sinal em tempo real (esquerda) e este sinal lido de forma discreta (direita).....	22
Figura 2-2 Exemplo de definição gráfica de IIP3 [20].....	25
Figura 3-1 Ilustração do receptor básico	31
Figura 3-2 O bloco receptor, destacado pelo quadrado.	33
Figura 3-3 Agrupamento dos blocos adjacentes ao LNA	33
Figura 3-4 As interações entre o LNA e o sistema	34
Figura 4-1 Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido.....	43
Figura 4-2 Fluxo de dados do segundo bloco do algoritmo.....	46
Figura 5-1 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade <i>offset</i> para norma de validação	52
Figura 5-2 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade percentagem para norma de validação	52
Figura 5-3 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade inclinação para norma de validação	52
Figura 5-4 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para norma de validação.....	54
Figura 5-5 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para norma de validação	54
Figura 5-6 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para norma de validação	54
Figura 5-7 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para norma de validação.....	55
Figura 5-8 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade <i>offset</i> para norma <i>Bluetooth LE</i>	56
Figura 5-9 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade percentagem para <i>Bluetooth LE</i>	56
Figura 5-10 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade inclinação para <i>Bluetooth LE</i>	56
Figura 5-11 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para <i>Bluetooth LE</i>	58
Figura 5-12 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para <i>Bluetooth LE</i>	58
Figura 5-13 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para <i>Bluetooth LE</i>	58
Figura 5-14 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para <i>Bluetooth LE</i>	59
Figura 5-15 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade <i>offset</i> para norma <i>ZigBee</i>	60
Figura 5-16 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade percentagem para <i>ZigBee</i>	60

Figura 5-17 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade inclinação para <i>ZigBee</i>	60
Figura 5-18 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para <i>ZigBee</i>	61
Figura 5-19 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para <i>ZigBee</i>	61
Figura 5-20 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para <i>ZigBee</i>	61
Figura 5-21 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para <i>ZigBee</i>	62
Figura 5-22 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade <i>offset</i> para norma <i>ZigBee</i>	63
Figura 5-23 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade inclinação para <i>ZigBee</i>	63
Figura 5-24 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência, LNA Reconfigurável e LNA Reconfigurável sem inclinação para o consumo de potência para <i>ZigBee</i>	64
Figura 5-25 Gráfico comparativo de diferença relativa entre consumos de potência dos LNAs reconfirmáveis contra o LNA de Referência.	64
Figura 5-26 Gráfico da diferença relativa do consumo de potência para o LNA Reconfigurável sem inclinação e o LNA Reconfigurável.	64
Figura 5-27 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência, LNA Reconfigurável e LNA Reconfigurável sem inclinação para o consumo de potência para <i>Bluetooth LE</i>	65
Figura 5-28 Gráfico comparativo de diferença relativa entre consumos de potência dos LNAs reconfirmáveis contra o LNA de Referência.	65
Figura 5-29 Gráfico da diferença relativa do consumo de potência para o LNA Reconfigurável sem inclinação e o LNA Reconfigurável.	65

1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem se constatado um aumento considerável na utilização de aparelhos eletrônicos portáteis, e que possuem comunicação sem fio, como por exemplo: telefones celulares, *tablets*, *notebooks*, entre outros [1-3].

Estes equipamentos eletrônicos portáteis possuem uma necessidade inerente comparada aos equipamentos eletrônicos não portáteis: a autonomia. Esta demanda torna imprescindível a necessidade de baixo consumo de energia, como um parâmetro fundamental para o uso contínuo dos aplicativos e funcionalidades.

A energia é uma importante variável a ser considerada em equipamentos eletrônicos portáteis, principalmente quando se trata de aparelhos com comunicação sem fio que por exigência dos próprios equipamentos e software neles instalados, possuem mais componentes para elevar o consumo de energia.

Com o intuito de definir os parâmetros de desempenho do equipamento de comunicação sem fio foram elaboradas diversas normas de comunicação [4-6]. Essas normas, dentre outras características, são responsáveis por determinar a sensibilidade dos aparelhos e a taxa de erro de *bits* (BER) [7, 8]. Em outras palavras, as normas definem os requisitos mínimos de funcionamento de um determinado tipo de comunicação, por exemplo, *IEEE802.11*, *IEEE802.15.4*, *Bluetooth*, entre outras. Para atender uma norma específica, um determinado aparelho está, por configuração de fábrica, operando sobre sua máxima potência para atender aos requisitos mínimos, embora este desempenho pode não ser necessário sempre.

Por outro lado, supõe-se um sistema de rádio frequência (RF) dividido em quatro blocos principais: LNA (*Low noise amplifier*), oscilador, misturador e baseband – sendo este quarto bloco, uma simplificação, para que este estudo seja genérico quanto à arquitetura. Dentre estes blocos o LNA, por ser o primeiro bloco da cadeia de recepção RF, é o de maior influência na figura de ruído do sistema global [9], constituindo assim um bloco importante para que o receptor possa operar sobre o sinal recebido.

Considerando as informações apontadas anteriormente surge uma pergunta: “É possível economizar energia quando o aparelho em questão não necessita de sua máxima potência para continuar atendendo a norma?”.

Com base no sistema de recepção RF formado pelos blocos descritos acima e com o objetivo de reduzir dinamicamente o consumo desse receptor, este trabalho propõe um estudo analítico de um sistema de recepção e a influência do LNA no desempenho global do sistema e no consumo de energia do mesmo, explorando a possibilidade da adaptação dinâmica do receptor de acordo com o ambiente de transmissão.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, o primeiro capítulo introduz este estudo, apresentam os objetivos e metodologia, o segundo apresenta o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho, o terceiro capítulo descreve as formulações matemáticas utilizadas no algoritmo. O quarto capítulo apresenta o algoritmo desenvolvido neste trabalho, o quinto capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações executadas, a conclusão e contribuições serão descritas no sexto capítulo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral:

Desenvolver um estudo analítico sobre o impacto de um LNA reconfigurável no consumo de energia de um receptor de rádio frequência padrão.

1.1.2. Objetivos específicos:

- Estabelecer as relações entre o consumo de energia e a potência do sinal de entrada no sistema e no LNA;
- Dimensionar um receptor de rádio frequência que atualiza os parâmetros de desempenho – ganho (G), figura de ruído (NF) e linearidade (IIP3) -, de modo que este possa ser ajustável de acordo com o nível de potência do sinal de entrada;
- Submeter o sistema desenvolvido a uma norma existente e estabelecer a relação entre o consumo do sistema e a potência do sinal de entrada;
- Analisar os resultados obtidos e, através destes, estabelecer a viabilidade da utilização deste estudo.

1.2. Metodologia

A proposta deste estudo é a análise do impacto de um LNA reconfigurável dentro de uma cadeia de rádio frequência padrão. Este estudo permitirá identificar os benefícios oriundos de um sistema capaz de adequar o seu desempenho à realidade do ambiente onde está inserido, no que concerne a qualidade do sinal na entrada do receptor.

A primeira etapa tem como principal objetivo construir formulações matemáticas, as quais serão a base para a simulação do ambiente e do funcionamento do receptor de rádio frequência. O sistema será analisado sob a perspectiva de três parâmetros: Ganho (G), a figura de ruído (NF) e o ponto de intersecção de terceira ordem ($IIP3$).

Na sequência, é definido o sistema de recepção RF, que será formado pela antena, quatro blocos básicos – LNA, misturador, oscilador, *baseband* - e, o CAD (conversor analógico digital). Com base nesta definição calcula-se o desempenho do sistema equivalente sabendo o desempenho local de cada bloco. Esse cálculo é baseado na equação de Friis [9, cap. 4]. Esta definição faz-se necessária para que seja possível a extração do desempenho do LNA em relação ao desempenho total do sistema. Neste ponto, portanto, será possível tornar fixo o desempenho dos outros blocos e utilizar somente a variação do desempenho baseado na (re) configuração do LNA.

A partir dos resultados obtidos é possível extrair a influência do LNA no desempenho do sistema global, assim como, sabendo a necessidade do sistema em função da potência de entrada, pode-se também extrair os requisitos de desempenho do LNA em função da potência do sinal de entrada.

Por fim, estima-se o consumo de potência do LNA que será avaliado através de um modelo de consumo. Desse modelo, extraem-se os valores para consumo de potência em função de diferentes parâmetros de desempenho do LNA. Os dados assim extraídos são base para a criação de uma tabela com o consumo do LNA em função da potência de entrada.

Após aplicar o processo descrito, repete-se o cálculo para diferentes valores da potência de entrada, permitindo assim reconhecer o consumo de potência do sistema baseado na potência do sinal de entrada.

A segunda etapa, por sua vez, tem início com a utilização de uma norma vigente. Os três parâmetros, G , NF e $IIP3$ são calculados de acordo com a norma estabelecida para o sistema completo.

Para realizar as análises sobre o sistema, é necessário atrelar o desempenho do sistema ao desempenho requerido pela norma. Isto pode ser feito seguindo o processo:

- A partir do BER (*bit error rate* – taxa de erro de bit) requerido, pode-se obter um SNDR (relação entre sinal sobre ruído e distorção) teórico. [7,10]
- O SNDR teórico extraído no passo anterior e serve como base para o cálculo de $IIP3$ e NF [6].

Um algoritmo em MATLAB será construído para permitir uma análise sistêmica sobre o desempenho mínimo necessário em termos de G , NF e $IIP3$ e calcular o valor estimado de consumo de potência em função da potência do sinal de entrada. Os resultados obtidos a partir deste algoritmo definirão a economia média de energia baseada na variação da potência do sinal de entrada para uma norma precisa.

2. SISTEMA RF E SEUS PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Os sistemas receptores de rádio frequência recebem informações oriundas de um transmissor através de ondas eletromagnéticas [9]. Estas ondas eletromagnéticas estão sujeitas a diversos fatores que comprometem seu aproveitamento.

Para possibilitar a concepção desses receptores RF, foram instituídas normas reguladoras dos diversos sinais que transitam pelo ambiente em que esses receptores estão inseridos.

Estas normas têm como objetivo estabelecer a faixa de funcionamento de um determinado sinal de transmissão, e para tal, é necessário estabelecer a sensibilidade que este receptor deverá suportar, sendo que o principal fator determinante desta sensibilidade é o ruído. Para reduzir o impacto do ruído na recepção deste sinal é necessária a utilização de energia elétrica.

Tendo em vista todo este contexto, este capítulo tem como propósito abordar os conceitos relativos a este sistema, e para tal, está dividido em três seções. A primeira seção tem como objetivo mencionar conceitos básicos relativos ao sistema de recepção de rádio frequência. A segunda seção é vinculada aos cálculos de desempenho de um sistema de rádio frequência. A terceira seção é reservada aos fatores relativos às normas que regem a recepção de sinal dos receptores de rádio frequência, estes fatores são subdivididos em duas partes: reconfigurabilidade e eficiência energética.

2.1. Receptores de Rádio Frequência

Esta seção abordará o receptor de rádio frequência como tema. Entende-se que um receptor de rádio frequência é um circuito eletrônico capaz de recepcionar uma onda eletromagnética oriunda de um meio externo, e, interpretar esse sinal de modo que a informação nele contida possa ser utilizada posteriormente a este receptor.

Para realizar a interpretação de um sinal externo, o receptor de rádio frequência executa algumas operações básicas que permitem o processamento e utilização deste sinal, estas operações básicas são: amplificação e deslocamento (translação) em frequência. Estas operações mencionadas são executadas em blocos funcionais que constituem o receptor de rádio frequência. Estes blocos serão detalhados na subseção 2.1.1.

2.1.1. Os blocos constituintes

Um receptor de rádio frequência é constituído por blocos, cada um destes blocos implementa uma determinada funcionalidade. Essas funcionalidades, por sua vez, interferem no sinal recebido de modo a condicioná-lo para um posterior processamento em banda de base.

a. LNA

O Amplificador de baixo ruído (LNA – *Low noise amplifier*) tem como objetivo amplificar o sinal de entrada inserindo o mínimo de ruído ao mesmo [17]. Por este motivo a posição do LNA na cadeia de recepção é usualmente próxima à antena evitando assim, perda da potência de sinal entre a antena e o LNA.

Devido a sua posição na cadeia de recepção, considera-se que o LNA possui interface com o ambiente exterior ao receptor [20]. Como o LNA se encontra no início da cadeia de recepção, este bloco é responsável pela maior parte do ruído, sendo que a inclusão de ruído deve ser variável de acordo com o desempenho de toda a cadeia de recepção [20].

Entretanto, para minimizar os efeitos da inclusão de ruído no sinal, o LNA deve promover um ganho suficiente para permitir que os outros blocos da cadeia possam utilizar o sinal sem interferência do ruído e linearidade no sinal de interesse [20].

Por outro lado, a potência do sinal de entrada no LNA pode variar de acordo com características externas, e por isso, o LNA deve variar o ganho de maneira que o sinal ainda assim consiga ser identificado pelos blocos subsequentes, ou seja, o aumento de ruído no sistema deve ser inferior ao incremento da potência do sinal de entrada, não reduzindo assim, a sensibilidade do sistema. Com a redução do ganho no LNA o valor de ruído tende a aumentar. [20]

O enfoque deste trabalho é analisar um LNA reconfigurável, este LNA deve possuir características semelhantes aos LNAs de baixo consumo de energia de 2,4 GHz. A Tabela 1, em parte extraída de [27], sumariza alguns LNAs da literatura quanto aos valores de IIP3, ganho, ruído e consumo de energia.

Tabela 1 Valores referentes às variáveis de configuração e LNA referência

Ganho (dB)	IIP3(dBm)	NF (dB)	P (mW)	Referência
14,2	-6,5	2	6,8	[34]
12	-3	1,8	0,9	[35]
20,5	-5	1,5	12	[36]
11	-7,2	4,8	19	[37]
16,8	-11,2	3,9	0,1	[38]
11,6	0,8	4,1	3,96	[39]
9,2	-15	4,5	0,9	[40]
13,6	7,2	4,6	0,26	[41]
21	-18	6,0	1,6	[42]
10	-17	4,76	0,4	[43]
15,1	2,2	2,88	24,3	[44]
15,9	-2,6	2,86	21	[44]
15,7	2,4	2,77	4,65	[45]
17,3	-2,2	2,36	4,65	[45]
83	6,1	-21,5	1,6	[46]

b. Misturador

O misturador é o componente eletrônico utilizado para combinar dois sinais, e possivelmente seus subprodutos [20], em um único sinal de saída [17, 28]. A operação indicada é a multiplicação entre os dois sinais de entrada. Os sinais que são multiplicados para este fim são: o sinal de entrada, oriundo do LNA, e, o outro sinal é extraído de um componente sintetizador de sinal, o qual emite o sinal em intervalos regulares.

O misturador recebe o sinal do LNA contendo ruído e distorção (IIP3), e a manutenção desta proporção é um compromisso do misturador. A manutenção da relação entre ruído e linearidade, além da atribuição de ganho ao sinal de interesse devem ser muito bem definidas, pois, a frequência do sinal de entrada no misturador é usualmente diferente da frequência do sinal de saída deste misturador. [20]

Para evitar possíveis intermodulações geradas pela multiplicação dos sinais, o misturador tem como premissa manter ao máximo possível a linearidade do receptor sem introduzir ruído [20]. O ruído é o elemento crítico do misturador, pois, além do ruído oriundo do LNA, o misturador também recebe o ruído provindo do oscilador e ambos são multiplicados para formar o sinal de produto.

O misturador, diferentemente do LNA, não opera sobre o ganho, entretanto, tem como premissa manter a relação linearidade e ruído. O misturador deve prover o ganho adequado para que o a potência do sinal se sobreponha ao ruído, e por este motivo, o *design* do misturar está intimamente ligado ao *design* do LNA [20].

c. Oscilador

O oscilador controlado por tensão (VCO) em um sistema de rádio frequência é um circuito cuja frequência de saída é controlada pela tensão. Este sinal oscilante alimenta o misturador. Para tal, o oscilador deve respeitar dois requisitos, a interface com o misturador e as especificações do sistema. [20]

Um importante atributo que fomenta o oscilador é a frequência de operação do sistema, o oscilador deve variar cobrindo toda a gama de frequência especificada pela norma, ou seja, cobrir todos os canais de comunicação dentro na norma. O oscilador deve possuir uma margem adicional de aceitação para uma possível variação de temperatura ou no processo de fabricação do dispositivo. [20]

O sinal gerado pelo oscilador guia o funcionamento do misturador, por isso, dependendo de como o sinal foi gerado, o oscilador pode reduzir efeitos indesejáveis no misturador [20].

Por outro lado, o oscilador também pode gerar ruído afetando a fase do sinal senoidal. Este ruído é conhecido como ruído de fase. O ruído de fase pode ser consequência de um ruído branco ou um ruído conhecido como *flicker noise* na tensão de controle do VCO. Para evitar esse tipo de efeito indesejado, o oscilador, por vezes, consome um pouco mais de energia para deixar o sinal um pouco mais puro para o misturador. [20]

d. Conversor Analógico Digital

O conversor analógico-digital tem como objetivo converter um sinal variante no tempo, que contém amplitudes contínuas (analógico) em um sinal que assume valores discretos de amplitude para instantes precisos no tempo, se tornando amostras que podem ser processadas e gravadas em memórias (sinal digital) [17]. A conversão de um sinal analógico para digital é importante para este sinal ser processado após a cadeia de recepção [17, 20].

A conversão, de um sinal analógico para um sinal digital, ocorre usualmente transformando um sinal analógico sobre um período de tempo em uma representação discreta deste sinal sobre o mesmo período de tempo, ou seja, executa a amostragem (*sampling*) deste sinal [20, 29, 30]. Um exemplo pode ser visto na Figura 2-1.

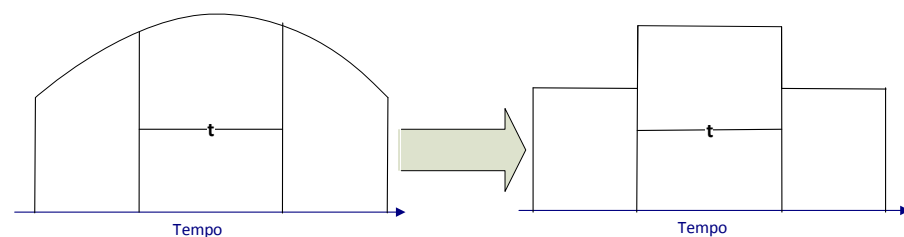


Figura 2-1 Comparação entre a leitura do sinal em tempo real (esquerda) e este sinal lido de forma discreta (direita)

Na Figura 2-1 tem-se um exemplo de um sinal analógico sobre domínio do tempo, à esquerda. À direita temos este mesmo sinal após ser amostrado com um período de amostragem t . Após a amostragem o sinal é discretizado, ou seja, assume valores apenas em intervalos de tempo iguais ao período de amostragem. Por outro lado, a operação de *sampling* pode gerar um efeito negativo chamado *aliasing*. Isto ocorre quando a amostragem discreta do sinal representa de forma equivocada o sinal analógico pelo qual é representado.

Para evitar esse efeito é necessário que o sinal seja filtrado, para que apenas a frequência requisitada seja convertida, e que o sinal passe pela operação de *sampling* respeitando o princípio de *Nyquist* – o sinal de amostragem é no mínimo igual a duas vezes a frequência do sinal. [30]

2.2. Cálculo de desempenho do sistema

Um receptor de rádio frequência, durante seu processo de concepção, deve levar em consideração dois fatores importantes quanto à sua modelagem: primeiro, as imperfeições geradas pelos blocos constituintes deste receptor, e, segundo, o meio em que este receptor está inserido.

As imperfeições dos blocos constituintes foi um assunto abordado na seção 2.1, e descrito separadamente para cada um dos blocos que formam o receptor de rádio frequência. Neste caso os cálculos de desempenho são importantes para que se consiga estabelecer os limites máximos toleráveis de cada uma dessas imperfeições.

Quando se considera as variáveis do ambiente que influenciam o receptor, este deve levar em consideração as necessidades para cada tipo específico de sinal que deverá receber, este tema será assunto da seção 2.3.

Embora os dois fatores tenham sido apresentados separados, eles interagem simultaneamente no projeto de um receptor. E, é por este motivo que o cálculo de desempenho do sistema se faz necessário.

2.2.1. Sensibilidade

A sensibilidade de um sistema de rádio frequência pode ser definida como o valor mínimo necessário de potência para que sinal entrada seja interpretado pelo receptor dentro de uma qualidade aceitável [20, 9, 27]. Juntamente com o sinal, o ruído e a distorção também podem estar presentes no *input* do receptor ocupando a mesma banda de frequência.

Portanto, entende-se como qualidade aceitável quando esta relação entre sinal e ruído (SNR) – ou sinal sobre ruído e distorção (SNDR) - atinge o valor BER (*bit error ratio*) definido pela norma de comunicação deste mesmo sinal [9, 27].

Por este motivo, pode-se dizer que BER está diretamente vinculada à sensibilidade do receptor, e, esta por sua vez, está diretamente vinculada tanto à potência do sinal de entrada, como também aos valores de ruído e interferência. Esta relação pode ser exemplificada pelas equações, extraídas de [20, 9], abaixo:

$$SNR = \frac{P_{sen}}{P_f} \quad (2.2.1-1)$$

$$SNDR = \frac{P_{sen}}{P_f + P_{iip3}} \quad (2.2.1-2)$$

A equação, 2.2.1-1, demonstra a relação entre a sensibilidade (SNR, *Signal-to-Noise ratio*), a potência do sinal de entrada, representado por P_{sen} , e a potência da resistência do ruído (P_f), enquanto a equação 2.2.1-2 inclui a potência da distorção na equação anterior (P_{iip3}), sendo que neste caso a sensibilidade passa a ser reconhecida por SNDR (*Signal-to-Noise-and-Distortion ratio*).

2.2.2. Linearidade

A linearidade, em um sistema de recepção, está diretamente associada à intermodulação que ocorre sobre o sinal de entrada no sistema. Esta intermodulação é determinada quando o produto de dois sinais de interferência aparece na banda de interesse do receptor [20, 9, 27]. O produto cria componentes que estão presentes no sinal de interesse do receptor, este fenômeno chama-se *IMD (Intermodulation distortion)* [9].

Com o intuito de medir o parâmetro de linearidade IIP3 realiza-se o seguinte procedimento, Figura 2-2: aumenta-se a amplitude (A_{in}) do sinal de entrada (*Fundamental*) e do produto da intermodulação (IM_3) e observa-se a variação das amplitudes dos sinais. Nota-se que existe um ponto onde as duas retas se encontram em uma projeção sobre a amplitude do sinal de saída (A_{OIP3}). Este ponto de intersecção é o *IIP3*.

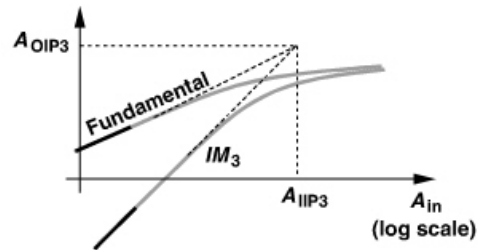


Figura 2-2 Exemplo de definição gráfica de IIP3 [20]

O *IIP3* corresponde ao ponto em que a potência do sinal útil na saída fica igual a *IMD3* na saída. [9].

2.2.3. Seletividade e Bloqueio

Seletividade é a medida da capacidade do receptor receber um sinal desejado a uma frequência pré-estabelecida mesmo que em presença de interferências próximas à frequência do sinal de interesse. Esta seleção de sinal deve considerar a possibilidade de existência de outros sinais adjacentes, e/ou uma variação aceitável da frequência do sinal do sinal desejado. [9]. Enquanto que o bloqueio mensura a habilidade de o receptor impedir que sinais de grande amplitude, mesmo longe da frequência do sinal de interesse, bloqueie o ganho do sinal. [9]

Tanto seletividade como bloqueio são determinados por duas características vinculadas aos blocos do receptor: primeira, pela atenuação da frequência gerada pelo filtro – seja sobre sinais adjacentes como em sinais indesejados. Segunda, ruído de fase gerado pelo oscilador. [9] Ou seja, filtros e osciladores são os blocos determinantes para mensurar a seletividade e bloqueio de um receptor.

O cálculo de seletividade e bloqueio são feitos de acordo com a degradação aceita para o sinal desejado, embora a degradação aceita para fins de bloqueio seja muitas vezes menor que para filtrar os sinais adjacentes. A degradação aceita pelo receptor é definida pela norma a qual este receptor está submetido [27]. Sendo este

valor determinante para definir as características de filtragem e ruído de fase deste receptor. [27]

2.3. O impacto do consumo de energia sobre os aparelhos móveis

Com o aumento da demanda por aparelhos móveis com comunicação sem fio, as empresas fabricantes passaram a focar seus esforços em aumentar a autonomia dos aparelhos, visto que este é o grande limitante para a sua utilização.

A autonomia destes aparelhos está ligada diretamente ao consumo de energia, por isso, áreas como eficiência energética e reconfigurabilidade se tornaram de grande interesse para as empresas e também para a academia.

Os conceitos e alguns trabalhos recentes sobre a reconfigurabilidade e a eficiência energética serão apresentados na sequência.

2.3.1. Reconfigurabilidade

A reconfigurabilidade de um circuito é a habilidade que este possui de recondicionar alguma parte ou a totalidade de seu hardware [25].

Esta característica tornou-se importante, pois, atualmente tem-se reparado que os requisitos funcionais, padrões e protocolos de dispositivos móveis podem ser alterados no decorrer da vida útil destes mesmos [52]. Por este motivo, a reconfigurabilidade dos dispositivos pode ser de grande relevância para as empresas e usuários em termos financeiros e funcionais.

A reconfigurabilidade de dispositivos pode apresentar várias vantagens: otimizar o desempenho do dispositivo, reduzir custos de fabricação, constituir um sistema tolerante a falhas ou redução do consumo de energia [52]. A implementação

da reconfigurabilidade pode ser feita de duas formas principais, através de software ou através de hardware.

Esta habilidade, a de reconfigurar-se, tem se mostrado uma tendência entre os circuitos modernos, sobretudo em comunicações *wireless* [11, 12]. Isto por que, atualmente os dispositivos que permitem a utilização destes recursos, podem se beneficiar no contexto de projeto do circuito, espaço e reutilização de blocos dentro da cadeia de recepção [25].

A reconfigurabilidade de dispositivos móveis está sendo alvo de muitas pesquisas acadêmicas. A Tabela 2 apresenta a análise de alguns artigos, os mais citados, sobre reconfigurabilidade.

Tabela 2 Síntese de artigos sobre reconfigurabilidade divididos por enfoque

Enfoque	Referência
<i>Reconfiguração por software</i>	
• Desenvolvimento de ferramenta para suportar reconfigurabilidade em arquitetura FPGA.	[53]
• SDR (<i>software defined radio</i>) totalmente reconfigurável por software.	[59]
• SDR com LNA reconfigurável para operar com mesma performance entre 1.7 e 3.2 GHz de frequência.	[19]
• Circuito de rádio frequência reconfigurável dinamicamente que propõe consumo de energia variável e compensação dinâmica de temperatura. Impressos em um único chip SDR.	[21]
<i>Reconfiguração por hardware</i>	
• LNA reconfigurável, que opera entre 2.4 a 5.4 GHz de frequência.	[54]
• LNA e PA (<i>power amplifier</i>) reconfiguráveis para operarem entre 2.7 e 3.2 GHz de frequência.	[55]
• Micro elétrico mecânico <i>relay</i> que suporta circuitos de rádio frequência de alto desempenho.	[56]
• Sistema de rádio frequência reconfigurável para operar em diferentes normas (<i>wireless</i> e Bluetooth).	[57]
• PA reconfigurável dinamicamente para operar em diversas normas.	[58]

De acordo com a literatura observada sobre reconfigurabilidade, é possível reparar que este assunto está dividido em dois grupos, a reconfigurabilidade por *software* e a reconfigurabilidade por *hardware*, conforme resumido na Tabela 2.

A reconfigurabilidade de circuitos eletrônicos por *software* é baseada na utilização de *hardwares* virtuais, principalmente focando no SDR, que é um sistema de rádio frequência definido de forma computacional, esta técnica foi utilizada em [19, 21 e 59]. O trabalho apresentado por [53] é baseado em outra técnica: o FPGA permite *upgrades* de *hardware* sem a necessidade de substituição física, pois, este

tipo de *hardware* possui uma inteligência computacional e linguagem característica que permite a reconfigurabilidade. Estas técnicas são utilizadas para atenuar dificuldades e expectativas de *hardware* para arquiteturas que permitam reconfiguração dinâmica.

Em contrapartida, a reconfiguração por *hardware* é baseada na variação de tensão aos quais os circuitos são submetidos. Nos artigos [54-58] a reconfigurabilidade proposta tem como objetivo proporcionar ao circuito um funcionamento mais amplo sobre o ponto de vista de frequência e normas, visto que em todos esses trabalhos a proposta é o funcionamento do receptor para [54-57] e transmissor [55 e 58] para uma gama de frequências.

O presente trabalho promove uma discussão sobre o impacto da reconfigurabilidade por *hardware* do LNA, entretanto sobre um enfoque diferente se comparado ao observado na literatura, visto que, a reconfigurabilidade buscada para este LNA tem como objetivo a redução do consumo de energia e não a amplitude de frequências suportadas pelo receptor, foco de estudos até então.

2.3.2. Eficiência energética

Uma importante característica dos dispositivos móveis é a autonomia, e a autonomia de um aparelho está diretamente relacionado com a sua eficiência energética. Segundo [47], uma das formas de se definir eficiência energética é pela quantidade de energia necessária para se processar um bit de dado. Para o caso de receptores, é a quantidade de energia utilizada para receber um bit de dado. O cálculo do consumo de energia do receptor é obtido a partir da soma do consumo de energia de todos os blocos pertencentes a este receptor [47].

Para dispositivos móveis, há um limitante para o consumo de energia, a bateria, a bateria possui uma capacidade limitada em se comparando ao poder de processamento, a bateria não obteve um avanço relevante em termos de tecnologia nos últimos 30 anos [48].

Por este motivo, a redução ou otimização da energia consumida tem sido muito discutido na literatura [48]. Algumas estratégias extraídas da literatura quanto à eficiência energética estão sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3 Sumário de estratégias de otimização da eficiência energética encontradas na literatura

Estratégia	Referência
<i>Otimização por software</i>	
• Algoritmo de otimização de roteamento de dados.	[16, 17]
• Algoritmo adaptativo ao ambiente onde o receptor está inserido.	[25]
<i>Otimização por hardware</i>	
• Otimização de blocos dentro da cadeia de recepção.	[26]
• Receptor latente dentro da rede de comunicação ativado por sensores.	[49]
<i>Eficiência energética para transmissores</i>	
• Comparativo de eficiência energética entre MIMO (multi-input-multi-output) system e SISO (single-input-single-output)	[50]
• Comparativo entre transmissores cooperativos, não cooperativos e híbridos.	[51]

Com base na literatura analisada, observa-se uma grande variedade de estratégias para atingir melhores resultados para a eficiência energética, para simplificar a comparação essas estratégias foram divididas em três grupos: Otimização da eficiência energética por *software*, otimização por *hardware* e eficiência energética de transmissores de rádio frequência.

Sabe-se que a transmissão de dados consome mais energia que a recepção de dados, por este motivo a eficiência energética para transmissores tem tido maior enfoque neste tipo de estudos, em [50 e 51] são apresentados comparativos de técnicas de otimização de eficiência energética para transmissores de rádio frequência.

A otimização da eficiência energética por *software* é baseado principalmente em algoritmos que evitem o consumo desnecessário de energia, isto pode ser atingido através de estratégias de roteamento da informação [16, 17], ou adaptando dispositivos de acordo com as características do ambiente onde estão inseridos [25].

Nos artigos [26 e 49] observaram-se duas estratégias distintas de otimização da eficiência energética por *hardware*, em [26] o foco de estudo foi à produção de uma antena com eficiência em consumo de energia. Já em [49] a estratégia foi

hibernar blocos dentro de um receptor de rádio frequência e aciona-los de acordo com a necessidade.

O presente trabalho propõe a análise do impacto da degradação do funcionamento de um LNA reconfigurável presente em um receptor de rádio frequência quanto à eficiência energética. Apresentando assim uma alternativa estratégica para otimização da eficiência energética por *hardware*.

3. LNA RECONFIGURÁVEL EM UM SISTEMA RF

Neste capítulo será apresentado a metodologia com a qual se buscou atingir o objetivo principal proposto por este estudo, em outras palavras, determinar o impacto de um LNA reconfigurável quanto ao consumo de energia em um sistema receptor de rádio frequência.

Para melhor exemplificar a metodologia, neste capítulo será utilizado um receptor de rádio frequência básico. Este por sua vez pode ser ilustrado pela Figura 3-1.

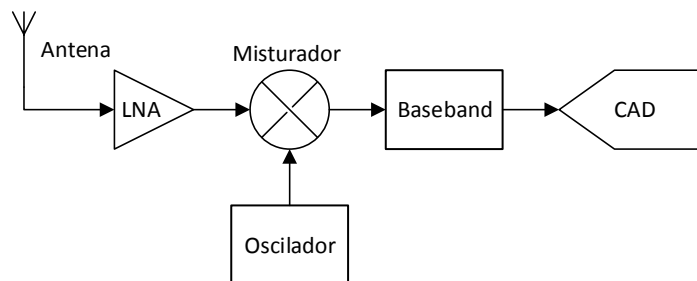


Figura 3-1 Ilustração do receptor básico

O motivo de este receptor ser genérico faz parte da metodologia do trabalho, visto que a metodologia adotada pode ser útil para otimização de outros blocos ao longo da cadeia receptora independente da arquitetura a qual pertence este receptor.

O método de otimização poderia se aplicar a qualquer bloco. Começar pelo LNA pareceu à escolha lógica por dois motivos: porque é o primeiro bloco da cadeia receptora e, do ponto de vista matemático, o isolamento de seus parâmetros dentro dos cálculos em cascata, é facilitado; O funcionamento do LNA não depende de condições especiais de nenhum outro bloco dentro da cadeia receptora.

Para melhor exemplificar a metodologia empregada neste trabalho, este capítulo está dividido em quatro seções: a primeira é referente aos conceitos de um LNA reconfigurável e a interação com o resto do sistema, a segunda seção abordará os cálculos de desempenho em cascata, a terceira apresentará os cálculos

referentes ao desempenho do LNA reconfigurável, enquanto que a quarta mostrará o detalhamento de duas normas de comunicação, as quais foram utilizadas para extração dos resultados e discussões.

3.1. LNA reconfigurável e o restante do sistema

Nesta seção considera-se a presença do receptor padrão de rádio frequência, como o apresentado anteriormente. Este receptor é inserido em um ambiente onde pode receber um sinal de potência variável.

O receptor padrão tal qual apresentado não possui nenhum parâmetro de ajuste, ou seja, por maior que seja a variação da potência do sinal de entrada, o gasto de energia é igual em qualquer que seja a potência do sinal recebido por este receptor.

Como experimento, supõe-se que o LNA deste receptor padrão seja substituído por um LNA reconfigurável em três parâmetros, sendo que estes três parâmetros podem ser modificados de acordo com a potência do sinal de entrada recebido. A única restrição é que o receptor continue atendendo a norma a qual está submetido em termos de BER.

O LNA contém os seguintes parâmetros reconfiguráveis: o Ganho G , a Figura de Ruído NF e o Ponto de Intersecção de Terceira Ordem na Entrada, IIP3.

O cálculo desempenho deste sistema em cascata é feito pela equação de Friis, a equação de Friis realiza um cálculo em cadeia sobre os blocos do sistema, desta forma, a escolha do LNA é baseada na sua posição dentro da cadeia de recepção, sendo o LNA o primeiro bloco da cadeia, este pode ser reconfigurado e experimentado sem que haja interferência de outros blocos no decorrer da cadeia.

A Figura 3-2 apresenta o bloco receptor destacado pelo quadrado negrito - este receptor está dividido em quatro blocos, LNA, misturador e oscilador, os quais foram mencionados no capítulo 2, e o *baseband* que corresponde a uma simplificação de todos os blocos que possam ser incluídos entre o primeiro

misturador do receptor e o CAD. Esta é a cadeia receptora que será utilizada como foco de estudo pela metodologia que está sendo descrita neste capítulo.

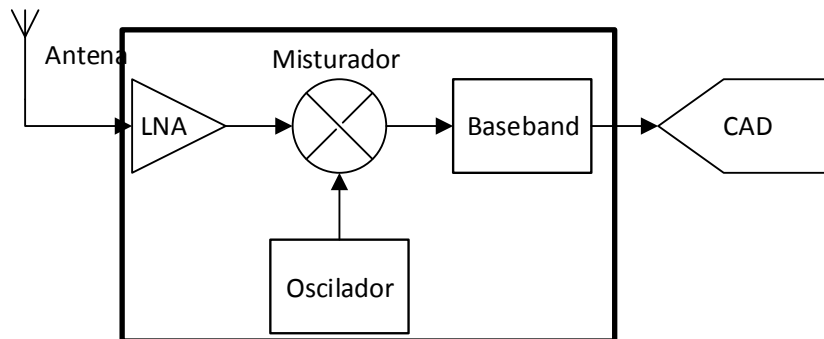


Figura 3-2 O bloco receptor, destacado pelo quadrado.

Para fins de cálculo os blocos adjacentes ao LNA serão considerados como um único bloco constituinte dentro da cadeia de recepção, como o apresentado na Figura 3-3. Comparando a figura anterior a esta, nota-se que misturador, oscilador e *baseband* foram unificados em um único bloco (bloco2).

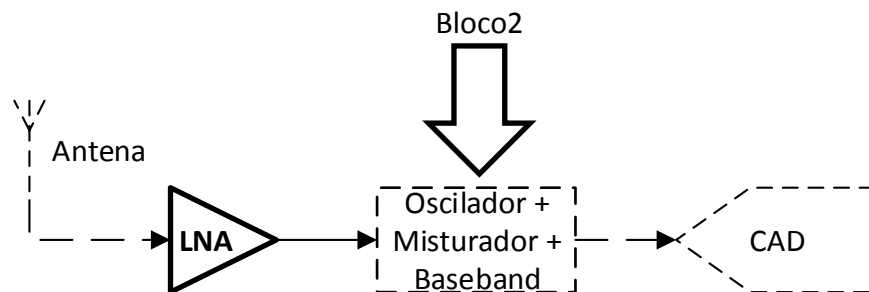


Figura 3-3 Agrupamento dos blocos adjacentes ao LNA

Unificando os demais blocos desta forma, é possível realizar os experimentos, as reconfigurações do LNA como o apresentado na figura 3-4. Ou seja, a potência do sinal de entrada (P_{in}) do sistema é variável, os blocos pontilhados mantêm valores constantes independentemente das variações de P_{in} , enquanto o LNA varia seus valores de ganho (G_{LNA}), ruído (NF_{LNA}) e IIP3 ($IIP3_{LNA}$).

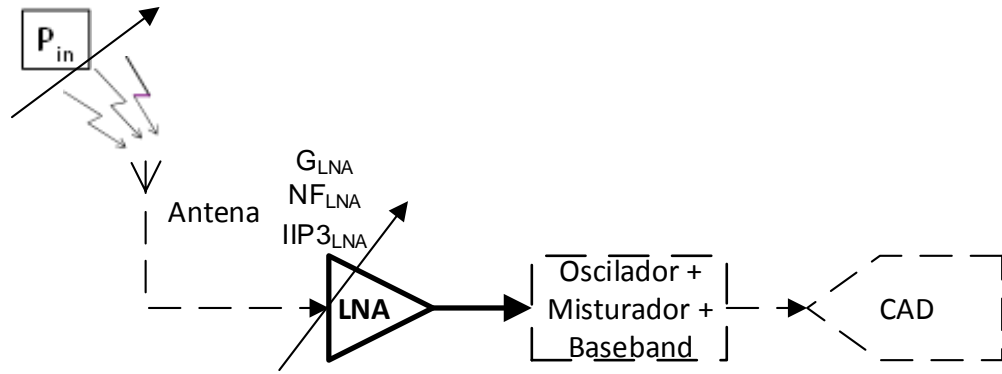


Figura 3-4 As interações entre o LNA e o sistema

Desta forma é possível extrair a relação entre o desempenho do LNA com base na potência do sinal de entrada e, também, as diferenças entre os consumos de energia referentes a cada variação de valores do LNA.

3.2. Definição dos parâmetros do sistema em função de uma norma: G, NF, e IIP3.

Considerando como o *noise floor* o ruído gerado pela antena no momento que o sinal chega ao receptor, o sistema desde sua entrada apresenta uma relação sinal sobre ruído inicial. Entre esse valor inicial e o mínimo aceitável no final da cadeia, podemos considerar que cada bloco da recepção contribui com uma degradação do SNDR ($SNDRdeg_{tot} (dB)$). Pode-se dessa maneira definir a máxima degradação do SNDR do sistema como [28]:

$$SNDRdeg_{tot}(dB) = P_{sen} - n_0 - SNR_{req} \quad (3.2-1)$$

Onde P_{sen} é a sensibilidade do sistema em dB , n_0 é o *noise floor* na entrada do sistema em dB e SNR_{req} o mínimo SNR aceitável na norma para respeitar as condições de taxa de erro de dados. A equação 3.2-1 apresenta o cálculo necessário para o valor de $SNDRdeg_{tot}$, o valor de $SNDRdeg_{tot}$ é obtido pela diferença entre o SNDR inicial ($P_{sen} - n_0$) e SNR_{req} . Valores são definidos pela

norma. O *noise floor* em *dB* depende do valor da densidade espectral de ruído da antena $PSD_{antenna}$ (*dBm/Hz*) e a banda ocupada pelo sinal modulado (onde será integrado todo o ruído) BW [28]:

$$n_0(dBm) = PSD_{antenna} + 10 \log_{10} BW \quad (3.2-2)$$

Como o valor de $SNDRdeg_{tot}$ depende não somente do ruído térmico, mas também outras de fontes de distorção como interferências que caem na banda do sinal útil e a intermodulação de terceira ordem (IMD_3), então a figura de ruído do sistema será então inferior ao $SNDRdeg$ de acordo com a porcentagem dessa distorção que pertence ao ruído (λ_{dB}), segundo [28]:

$$NF_{tot}(dB) = SNDRdeg_{tot} + \lambda_{dB} \quad (3.2-3)$$

O valor $SNDRdeg_{tot}$ é, também, requisito para o cálculo da linearidade do receptor, sendo o nível máximo distorção mais ruído permissível referenciado a entrada (nd_{max}), que é baseado na equação (3.2-1):

$$nd_{max}(dB_m) = n_0 + SNDRdeg_{tot} \quad (3.2-4)$$

A máxima distorção provinda de intermodulação será por sua vez o complemento de λ para o nível máximo de distorção mais ruído,

$$d_{max}(dB_m) = nd_{max} + (1 - \lambda)_{dB} \quad (3.2-5)$$

Após o cálculo de d_{max} , podemos considerar que no caso de teste de $IIP3$, d_{max} consiste unicamente em uma intermodulação de terceira ordem $IMD3(dBm)$, de maneira que o valor de $IIP3(dBm)$ do sistema é calculado da seguinte forma:

$$IIP3_{tot}(dBm) = \frac{1}{2} * ((2 * P_{int1} * P_{int2}) - d_{max}) \quad (3.2-6)$$

Com os valores de ruído e linearidade já definidos, falta definir o ganho do receptor. O cálculo do ganho é dividido em três etapas, a primeira corresponde à definição da máxima potência do sinal na entrada do *LNA* desconsiderando a

impedância e pegando o valor do sinal em V^2 , definida como $P_{vin}(V^2)$ em máximo ganho. Nesse modo, não é o sinal de interesse que representa o maior valor na entrada, mas a maior interferência não filtrada que é definida como sendo a potência da interferência de saturação ($P_{int-sat}(dBm)$) subtraída da impedância da antena ($R_{antenna}$):

$$P_{vin}(V^2) = \max(P_{int-sat}, P_{in}) - 10 \log_{10}(R_{antenna}) \quad (3.2-7)$$

Já o máximo ganho depende do fundo de escala (*fullscale* (FS)) do CAD dado também em V^2 . O sinal na entrada do CAD é considerado senoidal:

$$FS(V^2) = \left(\frac{V_{pp}/2}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (3.2-8)$$

Finalmente o ganho máximo fica:

$$G_{max} = \frac{FS}{(P_{vin}) \frac{P_{in}}{P_{sen}} \gamma} \quad (3.2-9)$$

Na equação 3.2-9 tem-se o cálculo do ganho máximo do receptor, este valor é referente ao valor do FS sobre a máxima potência do sinal de entrada do LNA (P_{vin}), multiplicado pelo calculo da relação entre: a potência do sinal de entrada (P_{in}) e a sensibilidade do LNA (P_{sen}). E, multiplicado, esta relação pela variável de reconfiguração denominada inclinação (γ).

$$G_{tot}(dB) = \max(G_{bloco2}, G_{max})_{dB} + \delta_{dB} \quad (3.2-10)$$

Por fim, o cálculo do ganho do receptor é o valor máximo entre o ganho máximo do receptor (G_{max}) e o valor do ganho do bloco2 (G_{bloco2}), isto porque, não é possível que o ganho do receptor seja inferior ao valor atribuído para o ganho do bloco2 (Figura 3-3). A isto, soma-se o valor da variável de configuração *offset* (δ), equação 3.2-10. O offset é uma variável que corresponde à diferença entre o ganho máximo possível pelo LNA e o ganho real gerado pelo LNA reconfigurável

Possuindo os valores referentes ao receptor (G_{tot} , $IIP3_{tot}$ e NF_{tot}), torna-se possível realizar a construção da formulação matemática referente ao cálculo em cascata de acordo com o apresentado na seção 3.1.

3.3. Aplicação para as especificações locais em função do sistema: a definição de G, NF, e IIP3 em cascata.

A sensibilidade e linearidade de uma cadeia de recepção, como a vista na seção 3.2, são calculadas em cascata utilizando os valores de sensibilidade e linearidade de todos os blocos da cadeia de recepção [28].

O cálculo em cascata é obtido ao aplicar as equações que serão conhecidas de ganho, ruído e linearidade para cada um dos blocos do receptor. O objetivo desta seção é apresentar as equações em cascata para cálculo de desempenho do LNA, entretanto, estas formulações matemáticas têm como pré-requisito os valores do bloco2 e os valores de linearidade, ganho e ruído gerais do receptor.

Uma vez que os valores do bloco2 serão definidos na seção 3.4, o único pré-requisito faltante são os valores atribuídos ao receptor. Estes por sua vez são obtidos através dos cálculos apresentados na subseção anterior.

A formulação matemática do cálculo em cascata é feita da seguinte forma: primeiramente extrai-se a equação em cascata para o receptor, depois, atribui-se dentro da cascata as partes relativas ao LNA e ao bloco2, e por fim, isola-se o valor relativo ao LNA. Realizando a formulação desta forma, tem-se o cálculo de desempenho do LNA em relação ao desempenho do receptor e do bloco2.

A primeira formulação feita foi a do ganho, uma vez que esta é a mais simples dentre as três variáveis de desempenho do LNA, e é utilizada nas formulações matemáticas de ruído, linearidade e consumo de energia. O ganho calculado em cascata é a soma dos ganhos de cada um dos blocos ao longo da cadeia receptora, extraído de [28].

$$G_{tot}(dB) = G_1(dB) + G_2(dB) + G_v(dB) + \dots + G_N(dB) \quad (3.3-1)$$

Como apresentado na equação 3.3-1, vê-se que o ganho do receptor (G_{tot}) é a soma dos ganhos de cada bloco, representados pelo G_x . Combinando esta equação com a estrutura apresentada na seção anterior, temos a seguinte equação:

$$G_{tot}(dB) = G_{LNA}(dB) + G_{bloco2}(dB) \quad (3.3-2)$$

Como os valores de G_{tot} e G_{bloco2} são conhecidos, para obter o valor de G_{LNA} basta isola-lo na equação matemática.

$$G_{LNA}(dB) = G_{tot}(dB) - G_{bloco2}(dB) \quad (3.3-3)$$

Após extrair o valor do ganho do LNA torna-se possível extrair o valor relativo ao ruído do LNA, uma vez que a equação em cascata para o ruído é dependente do ganho, segundo [9].

$$f_{tot} = f_1 + \sum_{i=2}^n \frac{f_i - 1}{\prod_{j=1}^{i-1} g_j} \quad (3.3-4)$$

Na equação 3.3-4 vê-se que o fator de ruído do receptor (f_{tot}), valor que equivale à figura de ruído no domínio linear, é o fator de ruído do primeiro bloco adicionado ao somatório do fator de ruído dos blocos adjacentes dividido pelo valor resultante da multiplicação dos valores de ganho referentes aos blocos anteriores de cada bloco em questão.

$$f_{tot} = f_{LNA} + \frac{f_2 - 1}{g_{LNA}} \quad (3.3-5)$$

Para o caso do receptor padrão de dois blocos utilizado como foco para este estudo, o cálculo de fator de ruído do receptor (f_{tot}) como se pode notar na equação 3.3-5 é a soma do fator de ruído do LNA (f_{LNA}) com a divisão do fator de ruído do bloco2 (f_2) subtraindo um, divididos pelo ganho do LNA, também em notação linear (g_{LNA}).

$$f_{LNA} = f_{tot} - \frac{f_2 - 1}{g_{LNA}} \quad (3.3-6)$$

A equação 3.3-6 apresenta o cálculo do fator de ruído do LNA em função do bloco2 e do receptor. Este cálculo equivale à subtração do fator de ruído do receptor (f_{tot}), pela divisão do fator de ruído do bloco2 (f_{bloco2}) subtraído em um, sobre o ganho do LNA (g_{LNA}). Ressaltando que os valores de f_{tot} , f_{bloco2} e g_{LNA} são conhecidos para este cálculo, tornando assim possível, a obtenção do fator de ruído do LNA.

Para calcular o $iip3$ do LNA também é necessária à utilização do ganho do LNA extraído pela equação 3.3-3. O cálculo em cascata do ponto de intersecção de terceira ordem (em V^2) é definido pela seguinte formulação matemática [9]:

$$iip3_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{iip3_1} + \frac{g_1}{iip3_2} + \frac{g_1 * g_2}{iip3_3} + \frac{g_1 * g_2 * g_3}{iip3_4} \dots \frac{g_1 * g_2 * \dots * g_{n-1}}{iip3_N}} \quad (3.3-7)$$

A equação 3.3-7 apresenta, em linear (V ou V^2), a extração do valor $iip3$ de um receptor ($iip3_{tot}$) como sendo a somatória de denominadores, onde cada elemento da soma é constituído pelos valores da multiplicação dos ganhos dos blocos anteriores divididos pela linearidade do bloco em questão. Ao contrário da equação do fator de ruído, são os últimos blocos do sistema que influenciam majoritariamente no valor final do $iip3$. Considerando o sistema a dois blocos:

$$iip3_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{iip3_{LNA}} + \frac{g_{LNA}}{iip3_2}} \quad (3.3-8)$$

Utilizando como base a equação 3.3-8, isola-se a variável correspondente à linearidade do LNA ($iip3_{LNA}$) em função das já conhecidas linearidade do receptor ($iip3_{tot}$), ganho do LNA (g_{LNA}) e linearidade do bloco2 ($iip3_2$).

$$iip3_{LNA} = \frac{iip3_{tot} * iip3_2}{iip3_2 - (iip3_{tot} * g_{LNA})} \quad (3.3-9)$$

A equação 3.3-9 apresenta o cálculo necessário para extrair o valor de linearidade do LNA ($iip3_{LNA}$) em função dos valores de linearidade do receptor ($iip3_{tot}$), linearidade do bloco2 ($iip3_2$) e ganho do LNA (g_{LNA}).

Com os valores de: ganho, ruído e linearidade específicos para o LNA, torna-se possível determinar, segundo [33], o consumo de energia do LNA. Isto é possível utilizando-se a equação de figura de mérito [33]:

$$FoM_{LNA} = \frac{g * iip3 * fc}{(f - 1) * p} \quad (3.3-10)$$

A equação 3.3-10 apresenta o cálculo de figura de mérito para o LNA, onde g é o ganho de potência do LNA, que por sua vez é a versão linear da equação 3.3-3, $iip3$ é a linearidade do LNA, obtido a partir da equação 3.3-9, f é o fator de ruído deste LNA, equação 3.3-6, P corresponde ao consumo de energia deste LNA e fc a frequência de corte. Como esse estudo propõe uma comparação entre dois LNAs que possuem os mesmos valores de fc e FoM_{LNA} , por isso, estes serão desconsiderados para fatores de cálculo, ou seja, para ambos serão associados o valor 1.

$$P_{LNA} = \frac{g * iip3}{(f - 1)} \quad (3.3-11)$$

A equação 3.3-11 apresenta a equação que calcula o consumo de potência por bit de um LNA com base em seus valores de ganho, linearidade e ruído. As equações apresentadas nesta seção viabilizam os cálculos de desempenho para um LNA genérico. Através da utilização de valores pré-determinados em um ambiente de teste controlado, torna-se possível realizar análises comparativas de desempenho do LNA.

3.4. Definição dos valores do Bloco2 de acordo com as normas utilizadas.

Neste capítulo foram apresentadas as formulações matemáticas para cálculo de ganho, ruído e linearidade do receptor utilizando-se os valores fornecidos pela norma de comunicação estabelecida, apresentadas na seção 3.2.

Na seção 3.3 foram apresentadas as formulações matemáticas utilizadas para a obtenção do desempenho do LNA, sendo que este desempenho é dependente dos valores de ganho, ruído e linearidade específicos ao LNA.

A partir das formulações matemáticas apresentadas nas seções 3.3 e 3.2, resta os valores referentes ao bloco2. Como definido na seção 3.1, o bloco2 é a conjunção de diversos blocos os quais determinam o receptor padrão.

Por este motivo os valores de ganho, ruído e linearidade do bloco2 também podem ser obtidos através da formula de Friis. Entretanto, para os blocos constituintes do bloco2 foram extraídos da literatura, [27], valores de ganho, ruído e linearidade. A Tabela 4 apresenta estes valores bloco a bloco para duas normas utilizadas para este trabalho.

Tabela 4 Valores bloco a bloco de ganho, ruído e linearidade divididos por norma [27].

Norma	Valor	Misturador	Oscilador	Baseband
Bluetooth LE	Nf (dB)	19,3	29,8	49,12
	IIP3 (dBm)	-18	-22,6	-32,77
	G (dB)	0	10	27
Zigbee	Nf (dB)	19,9	30,1	44,13
	IIP3 (dBm)	-15,3	-11,5	-36,70
	G (dB)	6	10	33

A Tabela 4 apresenta os valores de desempenho atribuídos aos blocos que constituem o bloco2 definido em 3.1. Os valores obtidos através da aplicação das equações de Friis para extração do desempenho do bloco2 podem ser visualizadas no capítulo 5, na Tabela 6.

4. MODELAGEM DO SISTEMA RF

Neste capítulo será apresentado um método para aplicar as equações apresentadas no capítulo anterior de maneira a minimizar o consumo de energia do LNA para cada valor de potência do sinal de entrada. Como mencionado

anteriormente, o método engloba: um conjunto de formulações matemáticas, três graus de liberdade e uma definição de norma de referência, sendo que o método garante o funcionamento do LNA para a norma de referência independente das configurações adotadas.

Um algoritmo foi desenvolvido em MATLAB para simular o funcionamento do método. Como resultado da sua execução, apresenta-se um conjunto de gráficos comparativos entre o LNA reconfigurável através do método proposto e um LNA também reconfigurável, mas com uma adaptação padrão.

Este capítulo será inteiramente dedicado à explicação deste algoritmo tanto a parte lógica que ele representa como os conceitos teóricos aplicados no mesmo.

4.1. Algoritmo

O algoritmo tem como principal objetivo testar a premissa feita por este trabalho, ou seja, determinar o impacto de um LNA reconfigurável sobre um receptor de rádio frequência, sob o ponto de vista de consumo de energia, se comparado ao impacto causado por um LNA clássico, que será denominado daqui em diante como *LNA referência*, considerando determinado modelo de consumo de potência (*a priori* linear conforme indicado em (3.3-11)). A comparação é feita dentro de uma cadeia de recepção genérica idêntica, e sob a mesma norma de comunicação.

Este algoritmo possui uma estrutura que define sua sequência de funcionamento, e esta estrutura explica o formato lógico pelo qual este algoritmo foi concebido e desenvolvido. A estrutura deste algoritmo está dividida em cinco blocos lógicos: Estruturação de dados (1), laços de teste (2), cálculos de valores (3), armazenamento do menor valor (4) e apresentação de resultados (5). O fluxo de dados é baseado no diagrama de blocos apresentado na Figura 4-1.

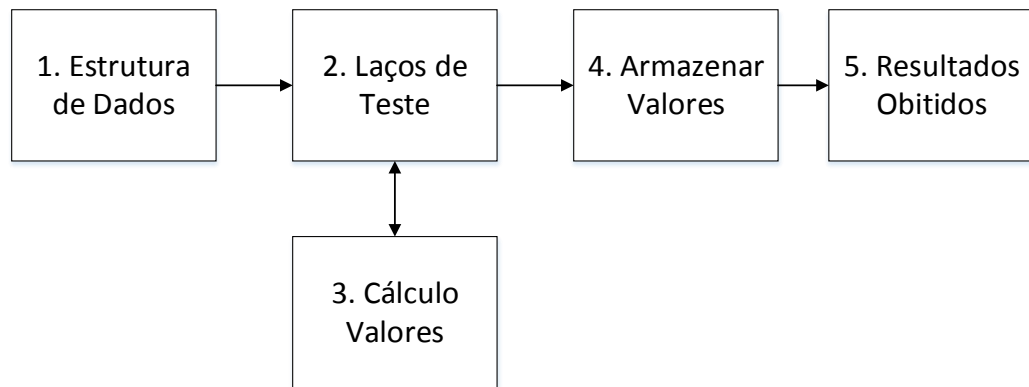


Figura 4-1 Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido

O diagrama de blocos representado pela Figura 4-1 apresenta a sequência em que os blocos lógicos são executados dentro do algoritmo. A explanação de cada um dos blocos lógicos estará presente nas seções a seguir.

4.1.1. Estruturação de Dados

A estruturação de dados, representado pelo bloco 1 na figura 4-1, é a primeira parte do algoritmo, e destinada a inicializar as variáveis que serão utilizadas no decorrer da execução do algoritmo. Nesta parte do algoritmo são declarados e inicializados os objetos que representam logicamente as entidades reais deste estudo.

Em termos de complexidade, este é o bloco mais simples, entretanto, de primordial importância, pois, este bloco que define os valores referentes à norma que será utilizada pelo algoritmo, assim como variáveis e objetos globais (ao algoritmo) que sustentam todo o processamento de dados. Dentro dessa etapa se definem os seguintes parâmetros ligados a uma determinada norma: P_{sen} – Sensibilidade; SNR_{req} – O mínimo valor da relação sinal sobre ruído necessário para respeitar a taxa de erro binária da norma; P_{int} – Potência dos sinais de interferência para o teste de IIP3; $P_{int-sat}$ – Potência da maior interferência que satura o receptor (normalmente é o canal bi adjacente quando não é filtrado antes do conversor analógico-digital), BW - banda passante do sinal de interesse a -30dBc, M -

parâmetro de margem entre a sensibilidade e a menor potência do sinal desejado quando na recepção se apresentam interferências. Os seguintes parâmetros estão ligados ao receptor e são fixados *a priori*: Z – Impedância de entrada do receptor, impedância da antena, e os parâmetros do segundo bloco $G_2(\text{dB})$, $NF_2(\text{dB})$ e $IIP3_2(\text{dBm})$ mais a tensão pico a pico do CAD, V_{pp} .

4.1.2. Laços de teste

Diferentemente do bloco anterior, este bloco – laços de teste – concentra o maior esforço computacional do algoritmo, este bloco corresponde a quatro laços aninhados de forma a possibilitar a combinação de cada valor da potência do sinal para cada valor distinto das variáveis de configuração do algoritmo (*offset* ($\delta(\text{dB})$), inclinação (γ) e porcentagem (λ)), com a finalidade do cálculo de consumo de energia do LNA. A lógica que corresponde a este bloco do algoritmo pode ser resumida pelo diagrama de blocos apresentado pela Figura 4-2.

A Figura 4-2 corresponde ao fluxo de dados do segundo bloco do algoritmo. O qual corresponde a 4 laços aninhados. Esta implementação representa todas as configurações possíveis das quatro variáveis de teste: P_{in} - a potência do sinal variável na entrada no sistema, – o *offset* δ entre o ganho máximo e o ganho de teste $\delta(\text{dB}) = G_{\max}(\text{dB}) - G_{\text{tot}}(\text{dB})$, *inclinação* γ do controle de ganho, que representa a relação do decaimento do ganho do sistema em função do aumento da potência de entrada $\gamma = \Delta G_{\text{tot}} / \Delta P_{in}$ e *porcentagem* λ da distorção total ($P_{nd-\max}$) que provém do ruído térmico, $\lambda = P_{n-\max} / P_{nd-\max}$.

Em um primeiro momento, têm-se a inicialização das variáveis de teste e das constantes de especificação sistema e dos parâmetros da segunda parte do receptor (conforme figura 3-4). O bloco de cálculo das especificações e do consumo do LNA é acionado. Caso o consumo para aquela potência de entrada, calculado pelo próximo bloco, seja o menor registrado até então, esse passa a ser a melhor configuração e os parâmetros são gravados em uma variável de saída. Para um

valor fixo de P_{in} , são testados os três loops de δ, γ, λ e a configuração que entrega o menor consumo é registrado.

A variável P_{in} é incrementada em simulação até um valor máximo. O incremento da potência do sinal de entrada implica no ajuste da figura de ruído, este ajuste não afeta o BER, pois, o valor base da figura de ruído é o $SNDRdeg_{tot}$ extraído a partir da norma, equação 3.2-1, este valor não é afetado pela variação da potência do sinal de entrada, garantindo assim que a BER estabelecida pela norma é respeitada para qualquer que seja o valor utilizado para P_{in} .

O resultado final do algoritmo é uma matriz de resultados que contém a melhor configuração em termos de consumo para cada valor de P_{in} . As variáveis de saída para cada ponto de P_{in} são: G_{LNA} , NF_{LNA} , $IIP3_{LNA}$, P_{LNA} , δ_{opt} , λ_{opt} , γ_{opt} .

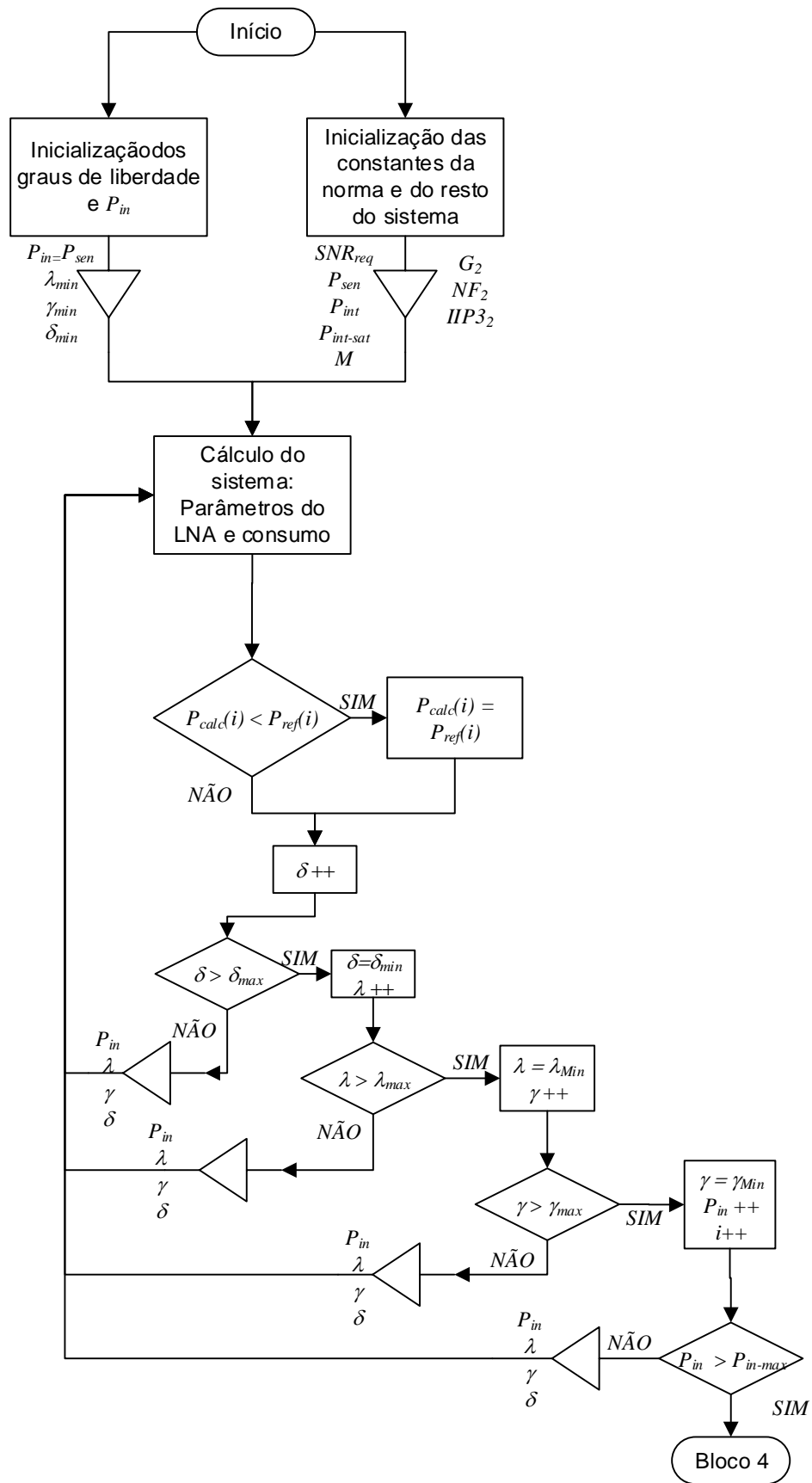


Figura 4-2 Fluxo de dados do segundo bloco do algoritmo

4.1.3. Cálculos de valores

Este bloco é o cerne do algoritmo, correspondente ao bloco intitulado ‘Cálculo do Sistema’ na Figura 4-2. É neste ponto que ocorrem os cálculos referentes ao consumo de energia do LNA. Esta parte do algoritmo que engloba as formulações matemáticas apresentadas no capítulo 3.

Esta parte do algoritmo reflete a descrição do método que calcula o consumo de energia do LNA. Este método tem como parâmetros de entrada: SNR_{req} – SNR requisitado pela norma, P_{int1} – Potência do primeiro sinal de interferência no teste de IIP3, P_{int2} – Potência do segundo sinal de interferência no teste de IIP3, $P_{int-sat}$ – Maior potência de sinal de entrada em ganho máximo que satura o CAD, pode ser uma interferência ou o sinal de entrada, e nesse caso o ganho total do sistema se reduz, M – A margem em dB entre a sensibilidade do sistema e a menor potência detectável do sinal de interesse em presença de interferência, G_2 – Ganho do segundo bloco, NF_2 – Figura de ruído do segundo bloco, $IIP3_2$ – IIP3 do segundo bloco, P_{in} – Potência de entrada do sinal de interesse, partindo da sensibilidade P_{sen} e aumentando gradualmente. Também nessa etapa se aplicam os valores do algoritmo δ, γ, λ . O desenvolvimento do método é dividido em duas partes distintas: a primeira parte é destinada ao tratamento dos valores necessários para o cálculo dos valores de sensibilidade e linearidade associados ao receptor. Nesta etapa estão implementadas as equações: 3.2-1 a 3.2-10. Como resultado da primeira parte tem-se os valores de NF_{tot} , $iip3_{tot}$ e G_{tot} .

Os valores resultantes da primeira parte associados aos valores de G_2 , NF_2 , $IIP3_2$ servem de entrada para a segunda parte, a qual corresponde ao cálculo de linearidade, ruído, ganho e consumo de energia para o LNA. Nesta parte ocorre a implementação das equações 3.3-3, 3.3-6, 3.3-9 e 3.3-11. A implementação deve respeitar esta mesma ordem, visto que, as equações 3.3-6 e 3.3-9 dependem do resultado da equação 3.3-3, e, por sua vez a equação 3.3-11 depende dos valores de todas as outras equações.

Como resultado final, este bloco lógico retorna G_{LNA} , NF_{LNA} , $IIP3_{LNA}$ e P_{LNA} , o qual é o valor correspondente ao consumo de energia do LNA.

4.1.4. Extração de dados do LNA reconfigurável

O quarto bloco lógico do algoritmo consiste na extração do menor valor do consumo de energia do LNA (P_{LNA}) para cada valor de P_{sen} , o que representa a combinação ótima das três variáveis de configuração (δ, γ, λ) para cada P_{sen} .

Este bloco ocorre ao final de cada iteração da potência do sinal de entrada, e a cada iteração do laço é extraída a combinação dos valores G_{LNA} , NF_{LNA} , $IIP3_{LNA}$ e P_{LNA} . Os valores escolhidos estão associados ao menor valor encontrado de P_{LNA} para cada valor de P_{sen} .

4.1.5. Construção de resultados

Esta etapa é a responsável por apresentar os valores obtidos pelas formulações matemáticas mencionadas no capítulo 3 e implementadas da forma que foi citado pela seção anterior.

A apresentação desses valores é feita no formato gráfico, são gerados gráficos comparativos que permitam uma análise objetiva sobre o desempenho de um LNA reconfigurável aplicado a uma norma específica.

Estes gráficos são apresentados em um plano cartesiano cotado entre o eixo das abscissas correspondente à potência do sinal de entrada, e o eixo das ordenadas o valor correspondente ao consumo de energia. Os valores apresentados neste gráfico correspondem ao resultado da seção anterior.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela execução do algoritmo apresentado no capítulo 4. Os resultados deste algoritmo serão as análises passíveis de serem extraídas a partir dos gráficos.

Os gráficos gerados pelo algoritmo são gráficos comparativos e os valores a serem comparados dizem respeito a duas simulações do algoritmo para cada norma atribuída nos objetos de inicialização do sistema. As duas simulações trazem estratégias diferentes, uma delas é o de LNA referência, este concerne ao primeiro grau de otimização de um LNA em um sistema de rádio frequência. Nesta otimização já é possível calcular dinamicamente os valores de ruído e linearidade. Enquanto isso, a outra estratégia é o LNA reconfigurável, este LNA apresenta o melhor resultado obtido para o consumo de energia do LNA objeto de estudo. O resultado é alcançado, para cada valor de potência de sinal de entrada atribuído ao LNA, comparando todas as combinações das variáveis reconfiguráveis δ , γ , λ , além dos valores calculados dinamicamente de ruído e linearidade.

O algoritmo mencionado no capítulo 4 é baseado na modelagem descrita no capítulo 3, e por este motivo, o correto funcionamento deste algoritmo é dependente de alguns pré-requisitos necessários à execução dos cálculos propostos pelas formulações matemáticas.

Os pré-requisitos apontados pela modelagem apresentada no capítulo 3 são os valores atribuídos ao bloco2 e os valores das normas que correspondem à definição do ambiente onde a cadeia receptora está inserida. O algoritmo, por sua vez, depende dos valores de parada – sendo estes utilizados como critério de decisão para os laços – para a potência do sinal de entrada e as variáveis: δ , γ , λ .

Com o intuito de apresentar resultados confiáveis e factíveis foram escolhidas três normas bases para este trabalho. A primeira norma foi utilizada para validar todas as formulações matemáticas desenvolvidas. Trata-se de uma norma de validação, mais próxima do desempenho de normas atribuídas a telefonia celular. As normas de telefonia celular são restritivas, e por este motivo serve de bons candidatos para validação das formulações matemáticas.

Os resultados obtidos com a aplicação da norma de validação foram promissores, e por isso, o próximo passo da investigação foi submeter o modelo proposta a normas reais: *ZigBee* e *Bluetooth LE (Low-Energy)*. Para que ambas pudessem ser utilizadas, estabeleceram-se os seguintes valores para da uma das normas (mostrados na Tabela 5).

Tabela 5 Valores para as normas utilizadas

Valor	<i>ZigBee</i>	<i>Bluetooth LE</i>	<i>Norma de validação</i>
Sensibilidade do sistema (Psig)	-85 dBm	-70 dB	-100 dB
SNR	3,45 dB*	13 dB*	12 dB
Pint	-52 dB	-50 dB	-52 dB
Valor de interferência	-52 dB	-48 dB	- 60 dB
Margem aceitável entre IIP3 e seletividade do sistema	3 dB	6 dB	3 dB

* Para os valores de sensibilidade (SNR), tem-se que o valor apresentado está acrescido de 3 dBm para uma margem de implementação.

A Tabela 5 apresenta os valores que consistem na norma na qual o sistema de rádio frequência está inserido, estes valores foram extraídos de [27].

Após estipulados os valores que correspondem ao ambiente onde o receptor está inserido, foi necessário estabelecer os valores apontados como premissa para o funcionamento das formulações matemáticas citadas no capítulo 3. Os valores para o bloco2 correspondem à: ganho, ruído e linearidade. Os valores utilizados para este trabalho foram baseados nos valores apresentados no capítulo 3 Tabela 4. Os valores utilizados para o bloco2 podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 Valores de sensibilidade e linearidade para as normas utilizadas

Valor do bloco2	<i>ZigBee</i>	<i>Bluetooth LE</i>	<i>Norma de validação</i>
Ganho	45 dB	33 dB	50 dB
Figura de Ruído	30 dB	39dB	12 dB
IIP3	-16 dBm	-18dBm	1 dBm

Por outro lado, o algoritmo também precisa de definição de valores que servem de critério de parada para os laços presentes no algoritmo. Estes valores correspondem aos intervalos de funcionamento dos laços do algoritmo e, por este motivo, são atribuídos igualmente independentes da norma utilizada. Os valores podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 Valores referentes às variáveis de configuração e LNA referência

Valor da variável	Valor mínimo	Valor Máximo	Granularidade	Valor LNA referência
Potência do sinal de entrada	= P_{sig}	= $P_{sig} + 10$ dB	0,1 dB	-
Offset	- 20 dB	0 dB	1 dB	0 dB
Inclinação	0 dB	3 dB	0,2 dB	1 dB
Porcentagem	0	100%	10%	50%

A Tabela 7 apresenta os valores mínimos e máximos para cada um dos valores utilizados pelos laços do algoritmo, e a granularidade representa em quanto cada uma das variáveis é incrementada a cada passo do laço, os valores mínimos denotam o início do laço e os máximos são os critérios de parada dos laços. Os valores aqui presentes foram obtidos durante simulações do algoritmo.

A última coluna da Tabela 7 apresenta os valores utilizados pelo LNA referência, o qual será comparado com o LNA reconfigurável. Este LNA não altera as variáveis de configuração.

Como a modelagem trata de uma formulação matemática, atribuída a uma lógica computacional para buscar pelo menor valor possível de consumo de energia, o sistema pode, eventualmente, atribuir valores não reais ao valor de ruído, por este motivo fixou-se o máximo de 15 dB para o ruído do LNA.

Por fim, a apresentação dos resultados está dividida em três seções, a primeira seção apresentará os resultados obtidos para a norma de validação, a segunda os resultados obtidos para a norma *Bluetooth LT* e a terceira seção será destinada aos resultados da norma *Zigbee*. Este capítulo ainda apresenta mais uma seção, a qual contém uma reflexão sobre os resultados obtidos sob uma ótica da relevância das variáveis de configuração.

5.1. Resultados da norma de validação

A utilização da norma de validação tem como primeiro objetivo validar a modelagem do sistema, o funcionamento das formulações matemáticas já discutidas

e, por fim, analisar em um primeiro momento se o sistema é capaz de reduzir o consumo de energia com base na utilização de um LNA reconfigurável.

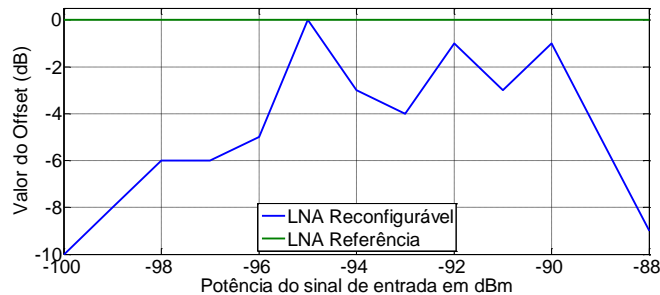


Figura 5-1 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *offset* para norma de validação

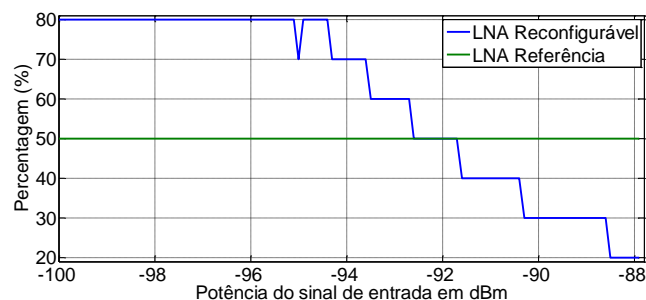


Figura 5-2 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *percentagem* para norma de validação

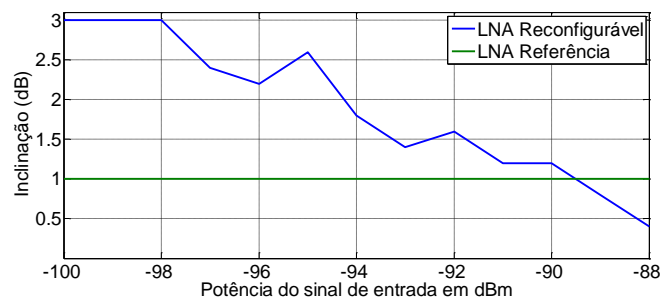


Figura 5-3 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *inclinação* para norma de validação

As figuras Figura 5-1, Figura 5-2 e Figura 5-3 apresentam os resultados obtidos com a variação dos graus de liberdade para cada valor utilizado na potência do sinal de entrada. É possível reparar que o comportamento destas variáveis tem maior diferença em relação ao valor de referência quando a potência do sinal de entrada se aproxima da sensibilidade do sistema, para este caso -100 dBm.

A Figura 5-1 apresenta o comportamento do *offset*, é possível reparar que os valores do *offset* do LNA Reconfigurável são sempre inferiores aos valores de referência durante toda a amostragem, este grau de liberdade afeta diretamente o

comportamento do ganho do LNA Reconfigurável. Neste caso, indica que o LNA Reconfigurável produz menos ganho que o LNA de Referência.

A porcentagem, Figura 5-2, possui um comportamento interessante, visto que em aproximadamente -93 dBm de potência do sinal de entrada, a composição do SNDR utilizado para o cálculo de desempenho do LNA Reconfigurável altera seu valor de relevância de ruído para IIP3.

A Figura 5-3 indica que a inclinação, o terceiro grau de liberdade, do LNA Reconfigurável é superior à inclinação do LNA Referência até pelo menos -90 dBm de potência do sinal de entrada, este é outro indicativo que o LNA Reconfigurável produz menos ganho que o LNA de Referência.

Nota-se que o LNA reconfigurável possui valores de linearidade superiores ao LNA referência até a potência do sinal de entrada atingir -92 dBm (Figura 5-4). Este comportamento motiva a porcentagem favorecer mais o ruído que a linearidade neste intervalo, e percebe-se justamente o contrário após a marca dos -92 dBm: como a linearidade do LNA reconfigurável fica inferior ao LNA referência, o ruído passa a ter maior relevância no consumo de energia.

Na Figura 5-5 tem-se que o ruído atinge o máximo valor possível para o LNA, isso influencia decisivamente para a maior variação do *offset*, pois, representa o valor diferencial da potência do sinal no ADC.

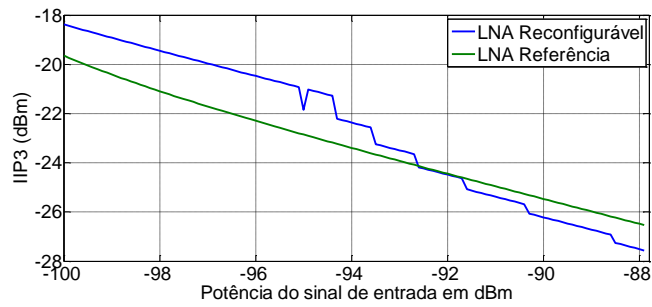


Figura 5-4 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para norma de validação

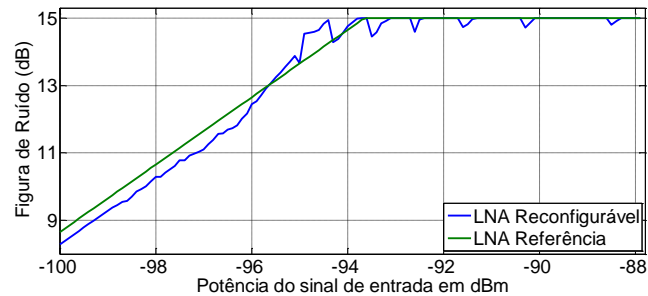


Figura 5-5 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para norma de validação



Figura 5-6 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para norma de validação

Por outro lado, a inclinação apresentada pela Figura 5-3 apresenta um comportamento diretamente proporcional ao ganho na Figura 5-6, a inclinação deixa de variar com grande amplitude por volta da potência do sinal de entrada em -96 dBm. Isto se explica pelo fato de o modelo apontar que o melhor resultado é quando se desliga o LNA a partir deste valor da potência do sinal de entrada, nota-se que no ponto da potência -96dBm o valor do ganho é próximo à zero, o que indica este comportamento.

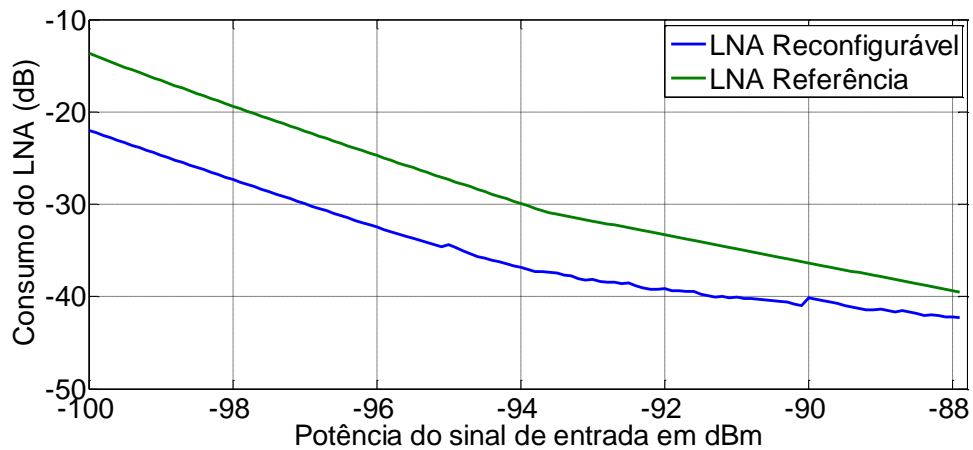


Figura 5-7 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para norma de validação

A Figura 5-7 apresenta o resultado mais importante do estudo, que é o comparativo entre os consumos de energia, em uma observação superficial nota-se que o consumo do LNA reconfigurável é expressivamente menor, no melhor caso a diferença é de aproximadamente 9 dB de diferença, o que significa um consumo oito vezes menor para o LNA reconfigurável. Nota-se que essa diferença é mais expressiva exatamente nos pontos onde a diferença do ganho gerado pelos dois LNAs é maior ($P_{in} \approx -99$ dBm). Isto representa que o LNA referência está amplificando o sinal de entrada muito acima do necessário para estes casos.

Com base nessas análises pode-se afirmar que o sistema respeita as formulações matemáticas de acordo com o resultado, e que o diferencial de consumo entre os LNAs sugere uma análise mais detalhada utilizando normas reais para o teste.

5.2. Resultados da norma *Bluetooth LE*

Como os resultados da norma de validação foram promissores, escolheu-se realizar o mesmo teste sobre a norma *Bluetooth*, esta norma é pouco rigorosa, ou seja, uma escolha adequada para a análise que se pretende extrair.

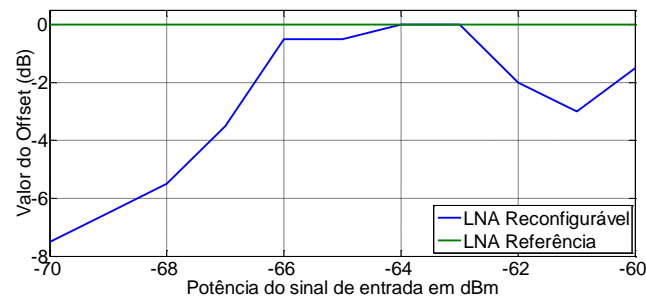


Figura 5-8 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *offset* para norma *Bluetooth LE*

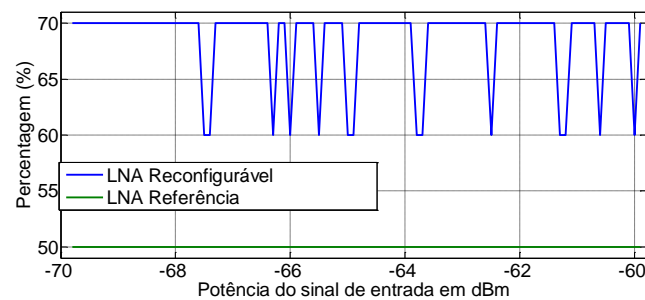


Figura 5-9 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *percentagem* para *Bluetooth LE*

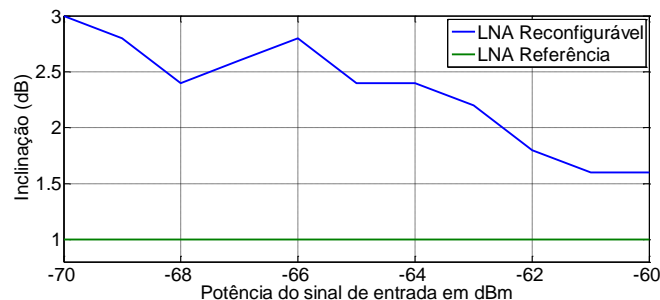


Figura 5-10 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *inclinação* para *Bluetooth LE*

A Figura 5-8 apresenta o comportamento do *offset* para a norma *Bluetooth LE*, nota-se que semelhante ao visto na norma anterior, o LNA Reconfigurável apresenta sempre valores inferiores à referência dentro da amostragem observada.

Na Figura 5-9 tem-se a variação da percentagem, pode-se observar que diferente da norma anterior, em nenhum momento o IIP3 é mais relevante na composição do SNDR do que o ruído, sendo esta proporção nunca é inferior a 60% em favor do ruído dentro a amostragem de valores observada.

A inclinação está presente na Figura 5-10, neste caso, que também é semelhante à norma anterior, a inclinação do LNA Reconfigurável é sempre superior à referência, um comportamento oposto ao observado para o *offset*.

Os valores de linearidade, representados pela Figura 5-11, apresentam um comportamento inverso se comparado com a norma de validação, o LNA reconfigurável gera menos linearidade que o LNA referência quando próximo à sensibilidade, embora este fato não represente uma grande variação, pois, é mascarado pelo ruído no cálculo de desempenho.

Por outro lado, pode-se reparar que o IIP3 do LNA referência próximo à sensibilidade apresenta uma curva quadrática, isto pode representar para este caso que o LNA referência pode não funcionar para alguns valores próximos a sensibilidade.

Ao analisar a Figura 5-12, repara-se que o ruído dos dois LNAs se mantém constantes no máximo valor permitido durante todo o teste realizado, isto justifica o comportamento da variável percentagem, que neste caso, o SNDR está ponderando mais para o ruído do que distorção.

Enquanto que na Figura 5-13 observa-se o comportamento do ganho dos dois LNAs, este comportamento reflete as indicações apontadas pelo *offset* e a inclinação comprovando que o LNA Reconfigurável pode degradar seu funcionamento e ainda assim respeitar a norma.

Para justificar o comportamento da linearidade do LNA referência, faz-se necessária a análise da Figura 5-14. Ao verificar o consumo de energia do LNA referência próximo à sensibilidade, observa-se a inexistência de alguns pontos na curva. Isso significa que o consumo do LNA referência nestes casos tende ao infinito, ou em outras palavras, o LNA referência não funciona para esta norma quando a potência do sinal de entrada for entre -70 dBm e -69 dBm, do fato de que os parâmetros do bloco2 praticamente esgotaram as margens para a especificação do LNA.

O LNA reconfigurável possui pontos neste mesmo intervalo de valores para a potência do sinal de entrada, por este motivo o desempenho deste é muitas vezes superior ao LNA Referência para sinais com potência até $-68,5$ dBm, após este valor a diferença de desempenho entre os dois LNAs se mantém constante, principalmente por ter os valores de *offset*, inclinação e porcentagem variando.

A diferença de desempenhos dos dois LNAs reflete o comportamento do ganho obtido, Figura 5-13, o LNA referência amplifica o sinal em 8 dB a mais que o LNA reconfigurável, comportamento que se mantém constante para todos os valores de potência do sinal de entrada.

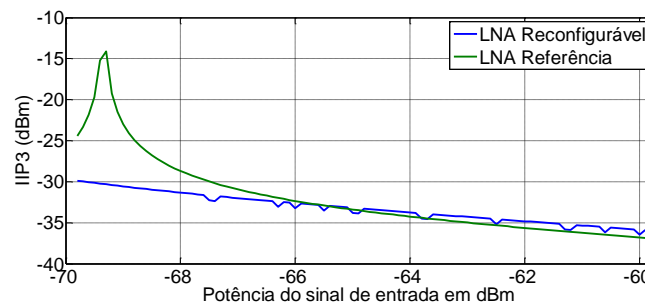


Figura 5-11 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para Bluetooth LE

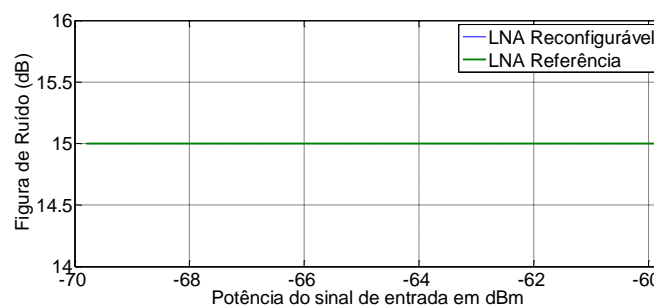


Figura 5-12 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para Bluetooth LE

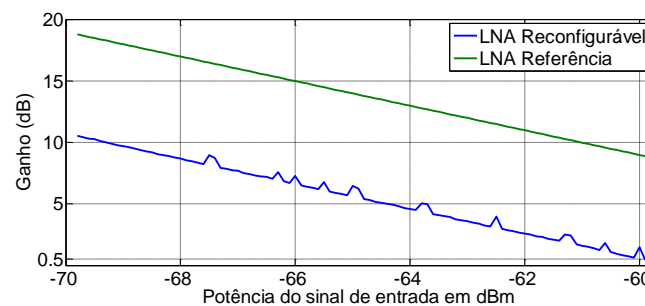


Figura 5-13 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para Bluetooth LE

Utilizando os testes apresentados nesta seção, é possível afirmar que o LNA reconfigurável apresenta um desempenho superior ao LNA referência, inclusive apresentando pontos em que o LNA reconfigurável funciona para a norma e o LNA referência apresenta pontos de falha. Essa é uma característica interessante visto que o LNA reconfigurável é capaz de se adaptar automaticamente da melhor maneira possível para o ambiente onde está inserido. Quando a curva de consumo do LNA de referência se estabiliza, ainda se tem uma economia de 7dB na potência do LNA reconfigurável.

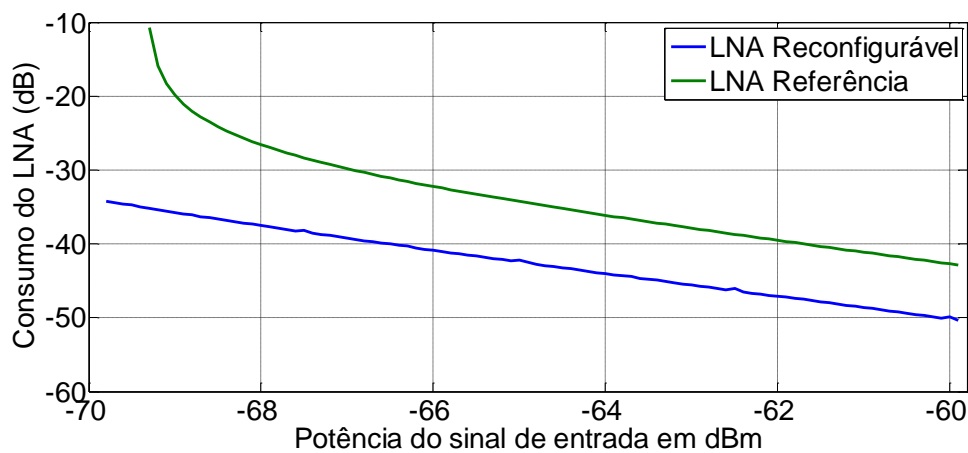


Figura 5-14 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para *Bluetooth LE*

5.3. Resultados da norma *Zigbee*

Visto que a norma do *Bluetooth LE* é uma norma reconhecidamente pouco restritiva, pois possui um valor de sensibilidade relativamente elevado se considerando com outras normas existentes, esta seção aplica a norma *Zigbee* sobre a metodologia desenvolvida.



Figura 5-15 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *offset* para norma *ZigBee*

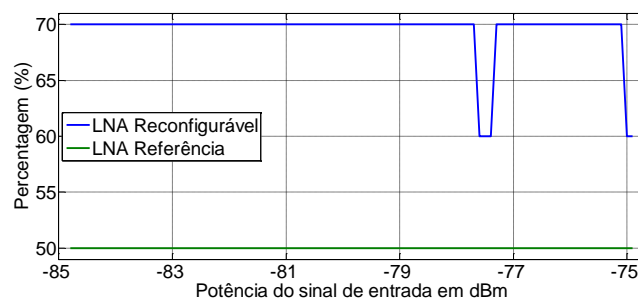


Figura 5-16 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *percentagem* para *ZigBee*

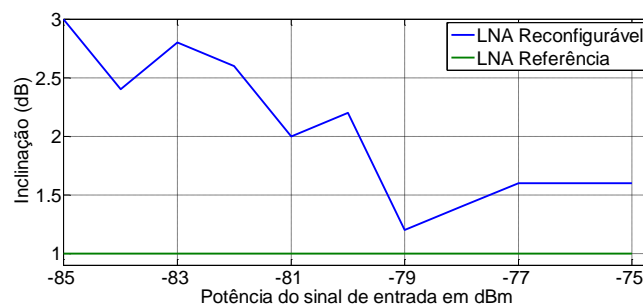


Figura 5-17 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *inclinação* para *ZigBee*

Nota-se que *offset* para a norma *Zigbee*, Figura 5-15, tem um comportamento semelhante ao visto nas outras duas normas, o LNA Reconfigurável também apresenta valores inferiores à referência, indicativo de economia de energia

através da degradação do funcionamento do LNA Reconfigurável em relação ao LNA Referência.

Na Figura 5-16 observa-se que a percentagem possui sua curva semelhante à norma anterior, isto é um reflexo da proporção do ruído no SNDR, que é superior a proporção do IIP3 na amostragem de dados observada.

A Figura 5-17 apresenta a variação de valores para inclinação. Novamente, percebe-se um comportamento inverso ao observado no *offset*. Confirmando a possibilidade da degradação do funcionamento do LNA Reconfigurável se comparado ao LNA Referência.

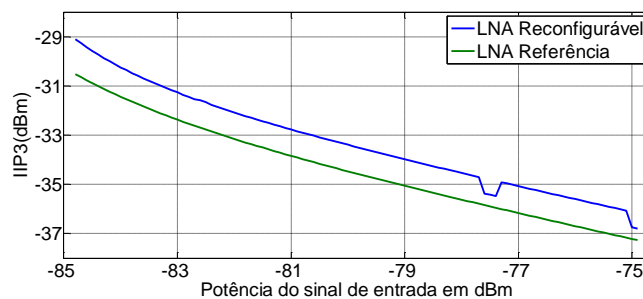


Figura 5-18 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho IIP3 para ZigBee

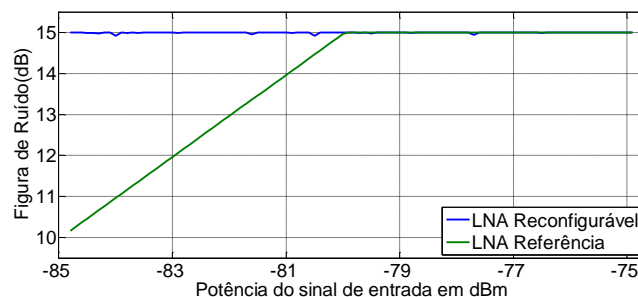


Figura 5-19 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho NF para ZigBee

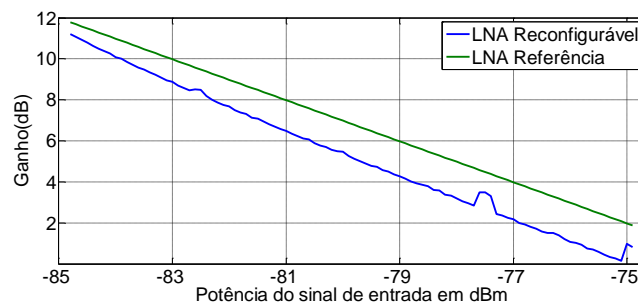


Figura 5-20 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para ZigBee

A linearidade obtida para esta norma é mais estável se comparada com as outras normas. Para todos os valores atribuídos à potência do sinal de entrada, obtém-se uma diferença constante entre os dois LNAs, e com o LNA Reconfigurável produzindo IIP3 mais elevado, fato observado na Figura 5-18.

Na Figura 5-19 é possível observar que em aproximadamente -80 dBm de potência do sinal de entrada o ruído dos dois LNAs se iguala, ambos no máximo possíveis.

O comportamento do ganho para ambos os LNAs que está representado na Figura 5-20 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do parâmetro de desempenho Ganho para *ZigBee*, neste gráfico está refletido os comportamentos de ganho e inclinação. O LNA reconfigurável produz menos ganho que o LNA Referência.

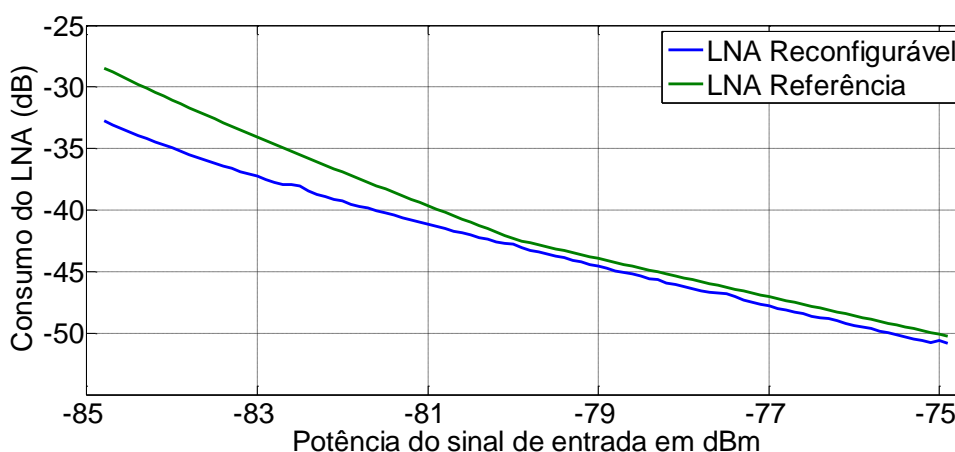


Figura 5-21 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável para o consumo de potência para *ZigBee*

A Figura 5-21 apresenta o comparativo dos desempenhos dos dois LNAs, é possível verificar que para esta norma o LNA reconfigurável tem desempenho próximo ao desempenho do LNA referência, sobretudo quando a potência do sinal de entrada é maior que -79 dBm, neste caso a economia de energia do LNA reconfigurável é inferior a 0,5 dBm, sendo, este, o reflexo do momento em que as figuras de ruído dos dois LNAs se igualam à Figura 5-19. No entanto, próximo à sensibilidade, a economia de energia pode atingir até 5dB.

Para analisar este resultado, deve-se levar em consideração que o LNA referência já possui um grau de otimização, pois, ele varia enquanto ruído e

linearidade para cada valor de potência do sinal de entrada e, mesmo sob essa circunstância, o LNA reconfigurável demonstrou-se capaz de consumir menos energia.

5.4. Ponderações finais

Sobre o LNA reconfigurável, pode-se observar que as variáveis configuráveis *offset* e inclinação têm comportamento aproximadamente inverso, como podemos ver na Figura 5-22 e Figura 5-23, ambas extraídas da norma Zigbee. Por este motivo, e levando-se em conta as formulações matemáticas, onde uma variável é inversamente proporcional à outra, cabe à análise se a extração de uma dessas duas variáveis afetaria de modo relevante a análise da economia de energia obtida na utilização do LNA reconfigurável.

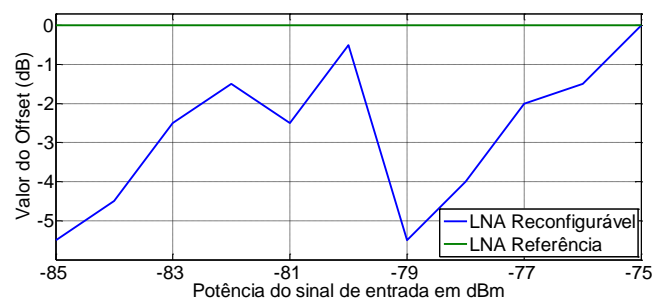


Figura 5-22 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *offset* para norma *ZigBee*

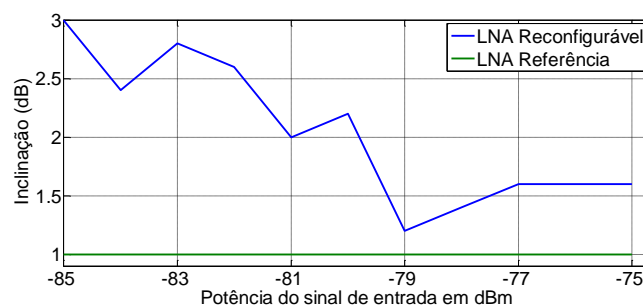


Figura 5-23 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência e LNA Reconfigurável do grau de liberdade *inclinação* para *ZigBee*

Na Figura 5-24 tem-se comparativamente o consumo de energia do LNA Referência, LNA Reconfigurável e o LNA Reconfigurável com dois graus de liberdade, sem a inclinação. Nota-se que o resultado do LNA Reconfigurável sem

inclinação é muito próximo ao resultado alcançado pelo LNA Reconfigurável. Este resultado é reforçado pelas figuras Figura 5-25 e Figura 5-26.

A Figura 5-25 apresenta a diferença relativa entre os LNA Reconfiguráveis e o LNA de Referência, resultado obtido a partir da subtração simples valor relativo ao consumo de potência do LNA Reconfigurável e LNA Referência, assim como o LNA Reconfigurável sem inclinação e LNA Referência. Observa-se que a diferença entre ambos é inferior a 1 dB, percebe-se que a diferença relativa ao LNA Reconfigurável sem inclinação é inferior à diferença relativa do LNA Reconfigurável, isto demonstra que o LNA Reconfigurável possui desempenho superior ao LNA Reconfigurável sem inclinação.

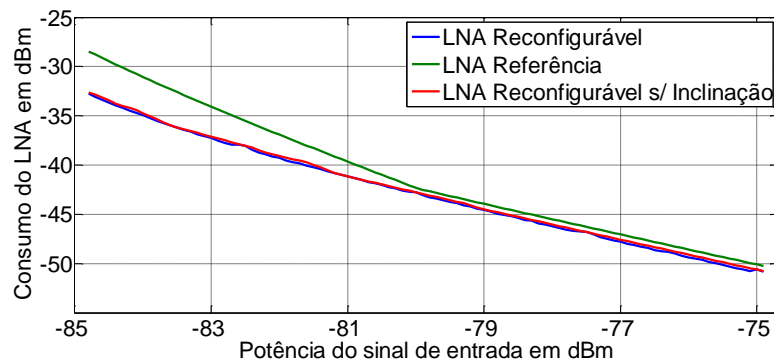


Figura 5-24 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência, LNA Reconfigurável e LNA Reconfigurável sem inclinação para o consumo de potência para ZigBee.

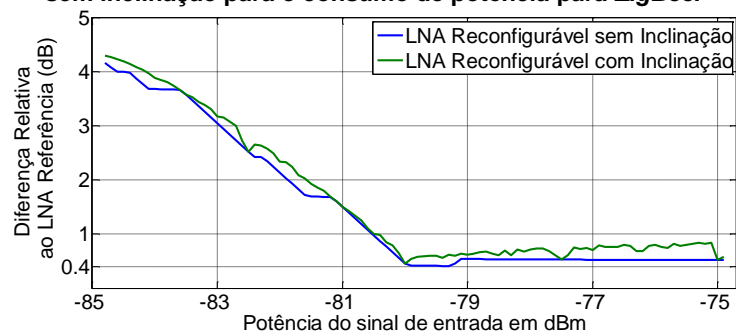


Figura 5-25 Gráfico comparativo de diferença relativa entre consumos de potência dos LNAs reconfiguráveis contra o LNA de Referência.

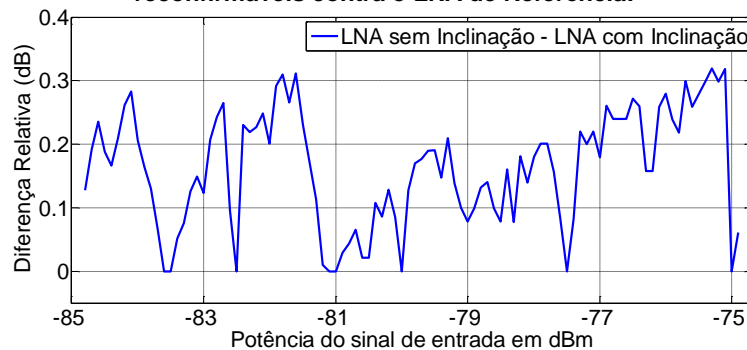


Figura 5-26 Gráfico da diferença relativa do consumo de potência para o LNA Reconfigurável sem inclinação e o LNA Reconfigurável.

Pode-se observar na Figura 5-26, que representa a diferença de desempenho entre os LNAs Reconfiguráveis (LNA Reconfigurável sem inclinação – LNA Reconfigurável). A diferença de desempenho entre os LNAs Reconfiguráveis é pequena, inferior a 0,4 dB, sendo que em alguns casos dentro da amostragem esses valores são iguais, isto ocorre quando a diferença é igual à zero. Considerando que a diferença entre desempenhos é extremamente pequena ou nenhuma, é possível afirmar que: para a norma Zigbee a variável de reconfiguração inclinação pode ser retirada sem que haja prejuízo no resultado relativo obtido.

Para confirmar a possibilidade de remoção do grau de liberdade inclinação, na Figura 5-27 tem-se esta mesma análise feita sobre a norma *Bluetooth LE*.

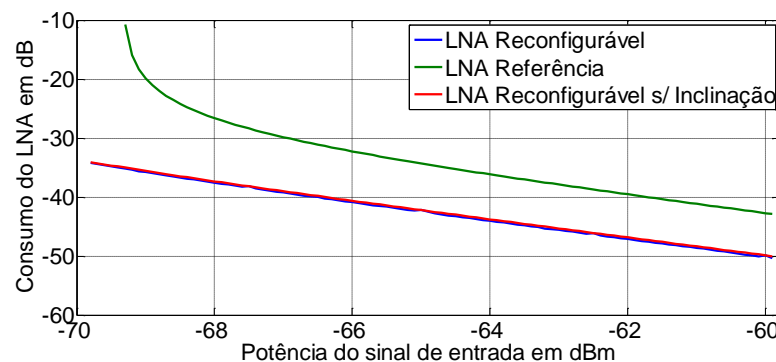


Figura 5-27 Gráfico comparativo entre o LNA de Referência, LNA Reconfigurável e LNA Reconfigurável sem inclinação para o consumo de potência para *Bluetooth LE*.

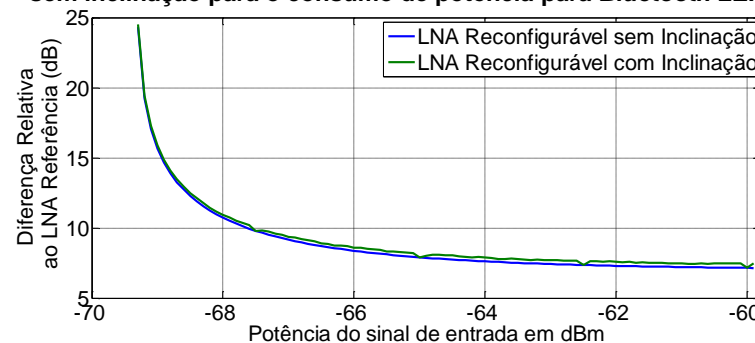


Figura 5-28 Gráfico comparativo de diferença relativa entre consumos de potência dos LNAs reconfiguráveis contra o LNA de Referência.

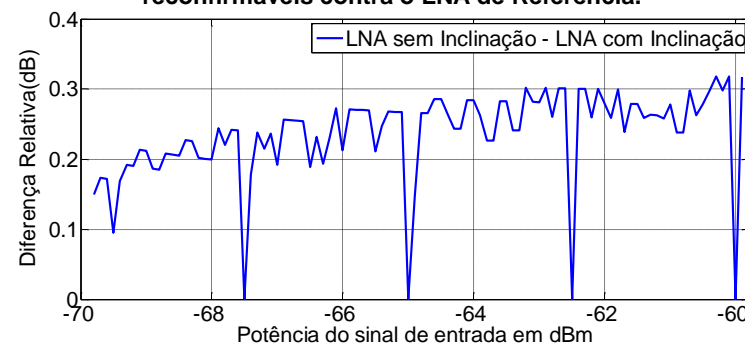


Figura 5-29 Gráfico da diferença relativa do consumo de potência para o LNA Reconfigurável sem inclinação e o LNA Reconfigurável.

É possível verificar o mesmo comportamento observado na norma *Zigbee* para a norma *Bluetooth LE*, ou seja, o grau de liberdade inclinação não apresenta uma diferença significativa. Observação reforçada pelas figuras Figura 5-28 e Figura 5-29.

No caso da Figura 5-28, tem-se a diferença relativa dos dois LNAs reconfiguráveis em relação ao LNA de Referência, vê-se que para o *Bluetooth LE* o LNA Reconfigurável também possui desempenho superior que o LNA Reconfigurável sem inclinação, visto que a diferença para o LNA Reconfigurável sem inclinação é inferior à diferença do LNA Reconfigurável.

Nesta direção, a Figura 5-29 mostra que a diferença de desempenho entre o LNA Reconfigurável sem inclinação e o LNA Reconfigurável é inferior a 0,4 dB e em mais situações que para o *Zigbee* esta diferença é zero significando valores iguais.

Desta forma, conclui-se que é possível utilizar apenas as variáveis: percentagem e o *offset*, sem afetar de forma significativa a economia de potência obtida pelo LNA Reconfigurável. Essa escolha torna o desenvolvimento do LNA Reconfigurável, em termos de hardware, mais simples, e, o algoritmo utilizado para testes mais eficiente. Isto porque, então, ambos utilizaram apenas 3 variáveis de análise, a potência do sinal de entrada, a percentagem e o *offset*.

6. CONCLUSÃO

Após a extração dos resultados obtidos e analisados no capítulo 5, pode-se afirmar que o método proposto apresenta em maior ou menor grau, uma possibilidade de economia de energia nos receptores de radiofrequência.

O objetivo geral, de executar um estudo sobre o impacto de um LNA reconfigurável dentro de uma cadeia de recepção de rádio frequência, foi atingido, pois, é possível afirmar que, para um modelo de consumo linear, um LNA reconfigurável consegue consumir menos energia se comparado aos LNA clássicos, ainda que possuam um grau de otimização. Sendo que para atingir esses resultados, a premissa do trabalho, que era respeitar a norma de comunicação estabelecida, foi respeitada em todos os casos utilizados para análise.

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos tiveram que ser igualmente alcançados. Ao construir as formulações matemáticas apresentadas no capítulo 3 foi possível estabelecer a relação entre o consumo de energia do LNA e a potência do sinal de entrada, esta relação possui uma série de dependências matemáticas, as quais culminam na inversão da equação de Friis, possibilitando assim a extração dos valores referentes ao LNA.

Para dimensionar o receptor de rádio frequência, foi necessário aplicar as formulações matemáticas do capítulo 3 em um algoritmo apresentado no capítulo 4. Este algoritmo tem como estratégia obter o valor de consumo de energia do LNA baseando-se na potência do sinal de entrada, norma escolhida e valores calculados de toda a cadeia de recepção. Com este algoritmo foi possível realizar testes exaustivos e obter dados de análise e comparação.

Um dos parâmetros de entrada do algoritmo é uma norma de comunicação, por este motivo foi possível analisar o impacto do LNA reconfigurável sob duas normas presentes no mercado (*Zigbee* e *Bluetooth LE*), assim como uma norma contendo valores de validação, os quais se assemelham a uma norma de telefonia móvel.

A partir dos resultados obtidos por este estudo é possível afirmar que foi desenvolvido um estudo do impacto do LNA reconfigurável sobre um receptor de rádio frequência padrão baseado em simulações do modelo no MATLAB.

E o resultado deste estudo demonstra que o LNA reconfigurável consome menos energia que o LNA clássico. Este resultado foi alcançado, pois, o LNA reconfigurável é capaz de atenuar seu desempenho e ainda assim continuar atendendo as normas estabelecidas para seu funcionamento.

6.1. Trabalhos futuros

O estudo realizado para atingir o objetivo geral deste projeto, revelou uma gama de possibilidades para estudos posteriores, visto que este estudo se baseou em um modelo de consumo linear, seria interessante estender este estudo para modelos de consumo não lineares.

A modelagem construída mensura e otimiza o consumo de energia do LNA, entretanto, o receptor possui outros blocos como mencionado no decorrer do estudo, isso indica a possibilidade de mensurar o desempenho de cada um dos blocos individualmente.

A implicação lógica da otimização de cada um dos blocos separadamente é atingir uma modelagem que permita a otimização global do sistema, sendo que esta modelagem global conte com a otimização em paralelo de todos os blocos pertencentes ao receptor.

O estudo mostrou que é possível economizar energia relaxando o desempenho do LNA de um sistema de rádio frequência, porém para medir a influência real deste ganho em um sistema receptor de rádio frequência específico, pode-se realizar um estudo estatístico sobre a média ponderada da potência do sinal de entrada que este receptor costuma trabalhar. Para tal, é necessário conhecer o canal de comunicação. Transmissores operam em faixas de potência específicas, e esta é a potência recebida menos à atenuação média do canal. Que depende de parâmetros conhecidos, como: distância entre os nós, ganho das antenas, frequência de transmissão, entre outros.

O estudo realizado é baseado em simulações do modelo em MATLAB, uma possibilidade de trabalho futuro é trabalhar as formulações matemáticas para que o estudo possa ser totalmente analítico.

REFERÊNCIAS

- [1] Mercado mundial de tablets prevê aumento de vendas para 126 milhões de unidades. **CBN**, set. 2009. Disponível em: <<http://cbn.globoradio.globo.com/comentaristas/ethevaldo-siqueira/2012/09/27/MERCADO-MUNDIAL-DE-TABLETS-PREVE-UMENTO-DE-VENDAS-PARA-126-MILHOES-DE-UNIDADES.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

- [2] Adolescentes lideram aumento de uso de celular no Brasil, diz Pnad. **G1 Tecnologia e Games**, set. 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2012/09/adolescentes-lideram-aumento-de-uso-de-celular-no-brasil-diz-pnad.html>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

- [3] Com aumento do uso de smartphones e tablets, gestão de dispositivos vai decolar. **ComputerWorld**, out. 2012. Disponível em: <<http://computerworld.com.br/negocios/2012/10/26/com-aumento-do-uso-de-smartphones-e-tablets-gestao-de-dispositivos-vai-decolar/>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

- [4] IEEE Std 802.15.4: "**Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)**," ed.

- [5] IEEE 802.11 Working Group. "**Bluetooth Low Energy Technology Specification - Controller And Host Volumes**," ed, 2008.

- [6] IEEE 802.11 Working Group. "**IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**." IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999) (2009): C1.

- [7] J. G. Proakis and M. Salehi, **"Digital Communications"**: McGraw-Hill, 2007.
- [8] I. S. 802.15.2™, **"Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands,"** 2003.
- [9] Q. Gu, **"RF System Design of Transceivers for Wireless Communications"**; Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [10] **"Digital Communications: Fundamentals and Applications"**, 2/E. Pearson Education, 2009.
- [11] Morgado, A.; del Rio, R.; de la Rosa, J.M., **"An Adaptive $\Sigma\Delta$ modulator for multi-standard hand-held wireless devices,"** Solid-State Circuits Conference, 2007. ASSCC '07. IEEE Asian , vol., no., pp.232,235, 12-14 Nov. 2007doi:10.1109/ASSCC.2007.4425773
- [12] Grayver E.; Dafesh, P., **"Multi-modulation programmable transceiver system with turbo coding,"** Aerospace Conference, 2005 IEEE , vol., no., pp.1484,1493, 5-12 March 2005doi:10.1109/AERO.2005.1559438
- [13] Gul, S.T.; Moy, C.; Palicot, Jacques, **"Two Scenarios of Flexible Multi-Standard Architecture Designs using a Multi-Granularity Exploration,"** Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on , vol., no.,pp.1,5,3-7 Sept. 2007 doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394129
- [14] Baschiroto, A.; Castello, R.; Campi, F.; Cesura, G.; Toma, M.; Guerrieri, R.; Lodi, A.; Lavagno, L.; Malcovati, P., **"Baseband analog front-end and digital back-end for reconfigurable multi-standard terminals,"** Circuits and Systems Magazine, IEEE , vol.6, no.1, pp.8,28, First Quarter 2006 doi: 10.1109/MCAS.2006.1607635

- [15] Heinzelman, W.R.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H., "**Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks**," System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on , vol., no., pp.10 pp. vol.2,, 4-7 Jan. 2000 doi: 10.1109/HICSS.2000.926982

- [16] Wei Ye; Heidemann, J.; Estrin, D., "**An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks**," INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE , vol.3, no., pp.1567,1576 vol.3, 2002 doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408

- [17] Smit, Lodewijk Theodoor. "**Energy-efficient wireless communication**". University of Twente, 2004.

- [18] Lorna A. Greening, David L. Greene, Carmen Difiglio, "**Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey**", Energy Policy, Volume 28, Issues 6–7, June 2000, Pages 389-401, ISSN 0301-4215.

- [19] Sugawara, H.; Yoshihara, Y.; Okada, K.; Masu, K., "**Reconfigurable CMOS LNA for software defined radio using variable inductor**," Wireless Technology, 2005. The European Conference on , vol., no., pp.547,550, 3-4 Oct. 2005 doi: 10.1109/ECWT.2005.1617778.

- [20] Razavi, Behzad, and Razavi Behzad. "**RF microelectronics**". Vol. 1. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

- [21] Okada, K.; Yoshihara, Y.; Sugawara, H.; Masu, K., "**A dynamic reconfigurable RF circuit architecture**," Design Automation Conference, 2005. Proceedings of the ASP-DAC 2005. Asia and South Pacific , vol.2, no., pp.683,686 Vol. 2, 18-21 Jan. 2005 doi: 10.1109/ASPDAC.2005.1466426

- [22] Sklar, Bernard. "**Digital communications**". Vol. 2. NJ: Prentice Hall, 2001.

- [23] Lacaita, Andrea, Salvatore Levantino, and Carlo Samori. **"Integrated frequency synthesizers for wireless systems"**. Cambridge University Press, 2007.
- [24] Proakis, J. G. **Digital communications**, 1995.
- [25] Bandyopadhyay, S.; Coyle, E.J., **"An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks,"** INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies , vol.3, no., pp.1713,1723 vol.3, 30 March-3 April 2003doi: 10.1109/INFCOM.2003.120919.
- [26] Laneman, J.N.; Wornell, G.W., **"Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks,"** Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE , vol.1, no., pp.7,12 vol.1, 2000 doi: 10.1109/WCNC.2000.904590.
- [27] Lolis, Luis. **"Agile bandpass sampling RF receivers for low power applications."** PhD diss., Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2011.
- [28] Friis, H.T., **"Noise Figures of Radio Receivers,"** Proceedings of the IRE , vol.32, no.7, pp.419,422, July 1944 doi: 10.1109/JRPROC.1944.232049.
- [29] Walden, R.H., **"Analog-to-digital converter survey and analysis,"** Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.17, no.4, pp.539,550, Apr 1999doi: 10.1109/49.761034.
- [30] Wepman, J.A., **"Analog-to-digital converters and their applications in radio receivers,"** Communications Magazine, IEEE , vol.33, no.5, pp.39,45, May 1995doi: 10.1109/35.393000.
- [31] Analog Filters. **Analog Dialogue.** Disponível em: <<http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/43-09/edch%208%20filter.pdf>>. Acessado em 28/01/2014.

- [32] Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schaffer, and John R. Buck. "**Discrete-time signal processing**". Vol. 5. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- [33] Brederlow, R.; Weber, W.; Sauerer, J.; Donnay, S.; Wambacq, P.; Vertregt, M., "**A mixed-signal design roadmap**," Design & Test of Computers, IEEE , vol.18, no.6, pp.34,24, Nov/Dec 2001.
- [34] C. P. Moreira, et al., "**A dual-mode dual-standard LNA for DCS1800/W-CDMA applications**," in Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology, 2006. DTIS2006. International Conference on, 2006, pp. 21-26.
- [35] T. K. Nguyen, et al., "**Ultra-low-power 2.4 GHz image-rejection low-noise amplifier**," in Electronics Letters, 2005, pp. 842-843.
- [36] N. Trung-Kien, et al., "**Image-rejection CMOS low-noise amplifier design optimization techniques**," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, pp. 538-547, 2005.
- [37] L. Qiang and Z. Yue Ping, "**A 1.5V 2–9.6 GHz Inductorless Low-Noise Amplifier in 0.13 μ m CMOS**," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, pp. 2015-2023, 2007.
- [38] S. Amin and H. Payam, "**A Novel Ultra-Low Power (ULP) Low Noise Amplifier using Differential Inductor Feedback**," in Solid-State Circuits Conference, 2006. ESSCIRC 2006. Proceedings of the 32nd European, 2006, pp. 352-355.
- [39] S. Asgaran, et al., "**Design of the Input Matching Network of RF CMOS LNAs for Low-Power Operation**," Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions, pp. 544-554, 2007.
- [40] H. Hsieh-Hung and L. Liang-Hung, "**A CMOS 5-GHz micro-power LNA**," in Radio Frequency integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2005. Digest of Papers. 2005 IEEE, 2005, pp.31-34.

- [41] B. G. Perumana, et al., "**A fully monolithic 260-/spl mu/W, 1-GHz subthreshold low noise amplifier**," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol. 15, pp. 428-430, 2005.
- [42] L. Viet Hoang, et al., "**Current-Reused Ultra Low Power, Low Noise LNA+Mixer**," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol. 19, pp. 755-757, 2009.
- [43] K. MinSuk, et al., "**A 2.4 GHz CMOS ultra low power low noise amplifier design with 65 nm CMOS technology**," in Solid-State and Integrated-Circuit Technology, 2008. ICSICT 2008.9th International Conference on, 2008, pp. 1488-1491.
- [44] Li, X.; Brogan, T.; Esposito, M.; Myers, B.; O, K.K., "**A comparison of CMOS and SiGe LNA's and mixers for wireless LAN application**," Custom Integrated Circuits, 2001, IEEE Conference on. , vol., no., pp.531,534, 2001 doi: 10.1109/CICC.2001.929836.
- [45] Chandrasekhar, V.; Hung, C. -M; Ho, Y. C.; Mayaram, K., "**A packaged 2.4 GHz LNA in a 0.15µm CMOS process with 2kV HBM ESD protection**," Solid-State Circuits Conference, 2002. ESSCIRC 2002. Proceedings of the 28th European , vol., no., pp.347,350, 24-26 Sept. 2002.
- [46] Fan Zhang; Keping Wang; Jabeom Koo; Miyahara, Y.; Otis, B., "**A 1.6mW 300mV-supply 2.4GHz receiver with -94dBm sensitivity for energy-harvesting applications**," Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2013 IEEE International , vol., no., pp.456,457, 17-21 Feb. 2013doi: 10.1109/ISSCC.2013.6487813
- [47] BRANTE, Glauber Gomes de Oliveira. "**Esquemas eficientes de comunicação digital e analógica com diversidade espacial e cooperativa**". 2013. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

- [48] Christine E. Jones, Krishna M. Sivalingam, Prathima Agrawal, and Jyh Cheng Chen. 2001. "**A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks**". *Wirel. Netw.* 7, 4 (September 2001), 343-358. DOI=10.1023/A:1016627727877 <http://dx.doi.org/10.1023/A:1016627727877>

- [49] Pletcher, N.M.; Gambini, S.; Rabaey, J.M., "**A 2GHz 52 μ W Wake-Up Receiver with -72dBm Sensitivity Using Uncertain-IF Architecture**," Solid-State Circuits Conference, 2008. ISSCC 2008. Digest of Technical Papers. IEEE International , vol., no., pp.524,633, 3-7 Feb. 2008 doi: 10.1109/ISSCC.2008.4523288

- [50] Shuguang Cui; Goldsmith, A.J.; Bahai, A., "**Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks**," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.22, no.6, pp.1089,1098, Aug. 2004 doi: 10.1109/JSAC.2004.830916

- [51] Kakitani, M., Brante, G., Souza, R. D., Munaretto, A., & Imran, M. A. (2013). "**Energy efficiency of some non-cooperative, cooperative and hybrid communication schemes in multi-relay WSNs**". *Wireless Networks*, 1-13.

- [52] Mesquita, Daniel, Fernando Moraes, Leandro Moller, and Ney Calazans. "**Reconfiguração Parcial e Remota de Dispositivos FPGA da Família Virtex.**" In *Anais do Congresso de Computação reconfigurável*, PUC-MG. 2001.

- [53] de Lima Ribeiro, Alexandre Alves. "**Reconfigurabilidade dinâmica e remota de FPGAs.**" PhD diss., 2002.

- [54] Chang-tsung Fu; Chun-Lin Ko; Chien-Nan Kuo, "**A 2.4 to 5.4 GHz Low Power CMOS Reconfigurable LNA for Multistandard Wireless Receiver**," Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2007 IEEE , vol., no., pp.65,68, 3-5 June 2007doi: 10.1109/RFIC.2007.380834

- [55] Jajoo, A.; Leon Wang; Mukherjee, T., "**MEMS varactor enabled frequency-reconfigurable LNA and PA in the upper UHF band**," Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International , vol., no., pp.1121,1124, 7-12 June 2009 doi: 10.1109/MWSYM.2009.5165898

- [56] Mihailovich, R.E.; Kim, M.; Hacker, J.B.; Sovero, E.A.; Studer, J.; Higgins, J.A.; DeNatale, J.F., "**MEM relay for reconfigurable RF circuits**," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE , vol.11, no.2, pp.53,55, Feb. 2001 doi: 10.1109/7260.914300

- [57] Agnelli, F.; Albasini, G.; Bietti, I.; Gnudi, A.; Lacaita, Andrea; Manstretta, D.; Rovatti, R.; Sacchi, E.; Savazzi, P.; Svelto, F.; Temporiti, E.; Vitali, S.; Castello, R., "**Wireless multi-standard terminals: system analysis and design of a reconfigurable RF front-end**," Circuits and Systems Magazine, IEEE , vol.6, no.1, pp.38,59, First Quarter 2006 doi: 10.1109/MCAS.2006.1607637

- [58] Deltimple, N.; Kerherve, E.; Deval, Y.; Jarry, P., "**A reconfigurable RF power amplifier biasing scheme**," Circuits and Systems, 2004. NEWCAS 2004. The 2nd Annual IEEE Northeast Workshop on , vol., no., pp.365,368, 20-23 June 2004doi: 10.1109/NEWCAS.2004.1359108

- [59] Craninckx, J.; Liu, M.; Hauspie, D.; Giannini, V.; Kim, T.; Lee, J.; Libois, M.; Debaillie, B.; Soens, C.; Ingels, M.; Baschiroto, A.; Van Driessche, J.; Van der Perre, L.; Vanbekbergen, P., "**A Fully Reconfigurable Software-Defined Radio Transceiver in 0.13 μ m CMOS**," Solid-State Circuits Conference, 2007. ISSCC 2007. Digest of Technical Papers. IEEE International , vol., no., pp.346,607, 11-15 Feb. 2007 doi: 10.1109/ISSCC.2007.373436